

In der Vergangenheit konnten sich deutsche Unternehmen insbesondere im Bereich der Hochtechnologie erfolgreich im internationalen Wettbewerb differenzieren. In den vergangenen Jahren hat sich das Wettbewerbsumfeld für deutsche Unternehmen jedoch zunehmend verschärft. Als Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Serienfertigung ist der Werkzeugbau ein zentraler Befähiger einer leistungsfähigen produzierenden Industrie. Insbesondere Marktbegleiter aus Niedriglohnländern sowie deren signifikant günstigeren Faktorkosten stellen jedoch eine Herausforderung für den Werkzeugbau dar. Dem zunehmenden Kostendruck für qualitativ hochwertige Werkzeuge können Werkzeugbaubetriebe in Hochlohnländern nicht durch eine Reduzierung der Einstandspreise begegnen.

Dahingegen birgt die Analyse und Auswertung der Lebenszykluskosten eines Werkzeugs die Möglichkeit, die Werkzeugkosten je produziertem Teil zu senken. Dazu ist es jedoch zunächst notwendig, Transparenz über die Werkzeugkosten sowie die beeinflussenden Faktoren entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus zu erhalten. Voraussetzungen sind eine Integration des Werkzeugbaus in die Wertschöpfungsprozesse des Kunden sowie eine ganzheitliche digitale Vernetzung. Auf dieser Basis kann in Kooperation mit dem Kunden spezifisches Werkzeug- und Produktionswissen aufgebaut und für eine systematische Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten eingesetzt werden. Hierdurch kann die Entwicklung und Umsetzung eines dringend benötigten Differenzierungsmerkmals für Werkzeugbaubetriebe in Hochlohnländern unterstützt und die Wettbewerbsfähigkeit der Branche Werkzeugbau nachhaltig verbessert werden.

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein Gestaltungsmodell zur strukturierten und systematischen Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse entwickelt. Dieses umfasst fünf Gestaltungselemente und soll dem Anwendenden als Zielbild und Handlungsleitfaden dienen. Den Kern des Modells bilden drei Aktivitätselemente, die die optimale Konfiguration der entscheidenden Elemente in Bezug auf die Erfassung, Auswertung und Nutzbarmachung der Werkzeuglebenszykluskosten beschreiben. Umrahmt werden die drei Aktivitätselemente von dem Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement, das die Wissensdokumentation sowie den Wissensabruf über den Werkzeuglebenszyklus darstellt. Die notwendige Struktur bildet das Strukturelement Digitale Werkzeugakte, in dem die notwendige Datenstruktur in Bezug auf die Werkzeugdaten und -kosten beschrieben ist.

ISBN 978-3-98555-255-9



9 783985 552559

Datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse

Bernd Haase



Bernd Haase

Datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse



Datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse

Data-Based Tool Life Cycle Cost Analysis

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Bernd Haase

Berichter/in:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Boos

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Dezember 2024

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Bernd Haase

Datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 3/2025



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Bernd Haase:

Datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse

1. Auflage, 2025

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Copyright Apprimus Verlag, Aachen, 2025

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen, Deutschland

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

ISBN 978-3-98555-255-9

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssystematik des Werkzeugmaschinenlabors WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Günther Schuh, Inhaber des Lehrstuhls für Produktionssystematik am WZL. Das durch ihn geschaffene einzigartige Umfeld praxisnaher, visionärer sowie herausfordernder Forschung hat wesentlich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen.

Für die Übernahme des Korreferats möchte ich Herrn Professor Wolfgang Boos danken. Frau Professorin Anna Mechler danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Herrn Professor Kai-Uwe Schröder für die Übernahme des Prüfungsbeisitzes.

Zahlreiche Industrieprojekte in der Branche Werkzeugbau bilden die Basis dieser Dissertation. Im Zuge dessen möchte ich mich herzlich für die enge Zusammenarbeit mit Herrn Professor Wolfgang Boos und Dr. David Welling von der WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH bedanken. Meine persönliche und fachliche Weiterentwicklung ist insbesondere auch auf das außergewöhnliche globale Branchennetzwerk der WBA zurückzuführen. Dieser kontinuierliche Kontakt zu Industrieunternehmen der Branche Werkzeugbau ermöglichte mir zudem die Validierung meiner Dissertation. Dafür bedanke ich mich bei den Herren Dr. Pascal Jud und Dr. Haitham Elfaham der Hilti AG sowie bei den Herren Gerhard Schrempp und Matthias Köhniger der PWO AG.

Ein besonderer Dank gilt meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am WZL, vor allem aus der Abteilung Unternehmensentwicklung. An die gegenseitige Unterstützung, enorme Leistungsbereitschaft sowie die vielen gemeinsamen Stunden auch abseits der Arbeit werde ich stets in bester Erinnerung zurückdenken. Unvergesslich bleiben für mich zudem zahlreiche nationale sowie internationale Dienstreisen. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Christoph Ebbecke, Dr. Tim Graberg und Dr. Niklas Kessler für viele fruchtbare sowie inspirierende Diskussionen zu meiner Dissertation. Dr. Christoph Kelzenberg und Dr. Gerret Lukas möchte ich für ihren unermüdlichen Einsatz als Vorgesetzte danken. Die neuen Perspektiven haben meine Forschung bereichert und das Vertrauen mir die Gruppenleitung zu übertragen hat meine persönliche Entwicklung in außergewöhnlichem Ausmaß geprägt.

Mein allergrößter Dank gilt meinen Eltern für unendliche Fürsorge, Unterstützung sowie Vertrauen in allen meinen Lebensphasen. Ihr habt mir diese Promotion ermöglicht. Mein ebenso großer Dank gilt dem unvergleichlichen und liebevollen Rückhalt meiner Ehefrau Anina Lucienne. Nur durch deine Rücksichtnahme, deinen Verzicht auf sehr viel gemeinsame Zeit sowie deine stets positive und humorvolle Art konnte ich diese Dissertation verfassen. Ich freue mich auf die gemeinsame Zeit mit dir. Meiner Familie und Anina Lucienne widme ich diese Arbeit.

Kurzzusammenfassung

In der Vergangenheit konnten sich deutsche Unternehmen insbesondere im Bereich der Premium und Hochtechnologie erfolgreich im internationalen Wettbewerb differenzieren. In den vergangenen Jahren hat sich das Wettbewerbsumfeld für deutsche Unternehmen jedoch zunehmend verschärft. Als Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Serienfertigung ist der Werkzeugbau ein zentraler Befähiger einer leistungsfähigen produzierenden Industrie. Insbesondere Marktbegleiter aus Niedriglohnländern sowie deren signifikant günstigeren Faktorkosten stellen jedoch eine Herausforderung für den Werkzeugbau dar. Dem zunehmenden Kostendruck für qualitativ hochwertige Werkzeuge können Werkzeugbaubetriebe in Hochlohnländern nicht durch eine Reduzierung der Einstandspreise begegnen.

Dahingegen birgt die Analyse und Auswertung der Lebenszykluskosten eines Werkzeugs die Möglichkeit, die Werkzeugkosten je produziertem Teil zu senken. Dazu ist es jedoch zunächst notwendig, Transparenz über die Werkzeugkosten sowie die beeinflussenden Faktoren entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus zu erhalten. Voraussetzungen sind eine Integration des Werkzeugbaus in die Wertschöpfungsprozesse des Kunden sowie eine ganzheitliche digitale Vernetzung. Auf dieser Basis kann in Kooperation mit dem Kunden spezifisches Werkzeug- und Produktionswissen aufgebaut und für eine systematische Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten eingesetzt werden. Hierdurch kann die Entwicklung und Umsetzung eines dringend benötigten Differenzierungsmerkmals für Werkzeugbaubetriebe in Hochlohnländern unterstützt und die Wettbewerbsfähigkeit der Branche Werkzeugbau nachhaltig verbessert werden.

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein Gestaltungsmodell zur strukturierten und systematischen Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse entwickelt. Dieses umfasst fünf Gestaltungselemente und soll dem Anwendenden als Zielbild und Handlungsleitfaden dienen. Den Kern des Modells bilden drei Aktivitätselemente, die die optimale Konfiguration der entscheidenden Elemente in Bezug auf die Erfassung, Auswertung und Nutzbarmachung der Werkzeuglebenszykluskosten beschreiben. Umrahmt werden die drei Aktivitätselemente von dem Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement, das die Wissensdokumentation sowie den Wissensabruf über den Werkzeuglebenszyklus darstellt. Die notwendige Struktur bildet das Strukturelement Digitale Werkzeugakte, in dem die notwendige Datenstruktur in Bezug auf die Werkzeugdaten und -kosten beschrieben ist.

Die Verifizierung des Gestaltungsmodells erfolgte anhand von zwei Fallbeispielen bei den Firmen Hilti AG und PWO AG. Der wissenschaftliche Beitrag der vorliegenden Arbeit liegt in der Entwicklung eines ganzheitlichen Lösungsansatzes zur Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse unter Berücksichtigung der sich aus dem Anwendungsfall ergebenden spezifischen Anforderungen. Unternehmen der Branche Werkzeugbau sind nun gefordert, das Gestaltungsmodell betriebsspezifisch unter Berücksichtigung der individuellen Rahmenbedingungen umzusetzen.

Abstract

In the past, German companies were able to successfully differentiate themselves from the international competition, particularly in the premium and high-tech sectors. In recent years, however, the competitive environment for German companies has become increasingly fierce. As the link between product development and series production, toolmaking is a key enabler of an efficient manufacturing industry. However, competitors from low-wage countries and their significantly lower factor costs pose a particular challenge for toolmaking. Toolmaking companies in high-wage countries cannot counter the increasing cost pressure for high-quality tools by reducing cost prices.

On the other hand, analyzing and evaluating the life cycle costs of a tool offers the possibility of reducing the tool costs per part produced. To do this, however, it is first necessary to obtain transparency about the tool costs and the influencing factors along the entire tool life cycle. The prerequisites for this are the integration of toolmaking into the customer's value creation processes and comprehensive digital networking. On this basis, specific tool and production knowledge can be built up in cooperation with the customer and used for a systematic analysis of tool life cycle costs. This can support the development and implementation of an urgently needed differentiating feature for toolmaking companies in high-wage countries and sustainably improve the competitiveness of the toolmaking industry.

As part of this dissertation, a design model was developed for the structured and systematic design of data-based tool life cycle cost analysis. This comprises five design elements and is intended to serve the user as a target image and guideline for action. Three activity elements form the core of the model, which describe the optimal configuration of the decisive elements in relation to the recording, evaluation and utilization of tool life cycle costs. The three activity elements are framed by the behavioral element Comprehensive Knowledge Management, which represents knowledge documentation and knowledge retrieval over the tool life cycle. The necessary structure is formed by the structural element Digital Tool File, which describes the necessary data structure in relation to the tool data and costs.

The verification of the design model was carried out using two case studies at the companies Hilti AG and PWO AG. The scientific contribution of the present work lies in the development of a holistic solution approach for the design of data-based tool life cycle cost analysis, taking into account the specific requirements resulting from the use case. Companies in the toolmaking industry are now required to implement the design model in a company-specific manner, taking into account the individual framework conditions.

I Inhaltsübersicht

I	Inhaltsübersicht	i
II	Inhaltsverzeichnis	iii
III	Formelzeichen und Abkürzungen	ix
IV	Abbildungsverzeichnis	xiii
V	Tabellenverzeichnis	xxiii
VI	Formelverzeichnis	xxv
1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation.....	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Zielsetzung der Arbeit	3
1.4	Forschungsansatz der Arbeit	4
1.5	Aufbau der Arbeit	10
2	Grundlagen	13
2.1	Werkzeugbau.....	13
2.2	Industrie 4.0	30
2.3	Data Analytics	45
2.4	Handlungsbedarf aus der Praxis	63
3	Analyse bestehender Ansätze	73
3.1	Bewertungssystematik	73
3.2	Beschreibung und Bewertung bestehender Ansätze	84
3.3	Aggregation der Bewertung.....	109
3.4	Handlungsbedarf aus der Theorie	111
3.5	Detaillierung der Forschungsfrage	111
4	Konzeption des Gestaltungsmodells	115
4.1	Grundlagen der Modellbildung	115
4.2	Merkmale des Gestaltungsmodells	121
4.3	Konzeption des Gestaltungskonzepts	125
4.4	Synthese des Gestaltungskonzepts	133
4.5	Zwischenfazit	134

5	Detaillierung der Gestaltungsfelder	139
5.1	Strukturelement Digitale Werkzeugakte	139
5.2	Aktivitätselemente.....	167
5.3	Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement	239
5.4	Wechselwirkungen der Gestaltungselemente	266
6	Verifizierung anhand von Fallbeispielen.....	269
6.1	Fallbeispiel 1: Hilti AG.....	269
6.2	Fallbeispiel 2: PWO AG	274
6.3	Kritische Reflexion	278
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	281
8	Anhang	285
VII	Literaturverzeichnis.....	293

II Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsübersicht.....	i
II	Inhaltsverzeichnis.....	iii
III	Formelzeichen und Abkürzungen.....	ix
IV	Abbildungsverzeichnis.....	xiii
V	Tabellenverzeichnis.....	xxiii
VI	Formelverzeichnis.....	xxv
1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation.....	1
1.2	Problemstellung.....	2
1.3	Zielsetzung der Arbeit.....	3
1.4	Forschungsansatz der Arbeit.....	4
1.5	Aufbau der Arbeit.....	10
2	Grundlagen.....	13
2.1	Werkzeugbau.....	13
2.1.1	Begriffsdefinition und -abgrenzung.....	13
2.1.1.1	Definition Werkzeug.....	13
2.1.1.2	Definition Werkzeugbau.....	14
2.1.2	Branchenstruktur.....	15
2.1.3	Leistungsspektrum.....	17
2.1.4	Werkzeugbau in der Wertschöpfungskette.....	20
2.1.5	Kundeninteraktion im Werkzeugbau.....	22
2.1.6	Werkzeuglebenszyklusphasen.....	24
2.1.7	Werkzeuglebenszykluskosten.....	26
2.2	Industrie 4.0.....	30
2.2.1	Begriffsdefinition und -abgrenzung.....	30
2.2.1.1	Begriffsdefinition Industrie 4.0.....	30
2.2.1.2	Begriffsdefinition Digitalisierung.....	34
2.2.1.3	Begriffsdefinition digitale Vernetzung.....	34
2.2.2	Technologische Befähiger von Industrie 4.0.....	35

2.2.2.1	Cyber-physische Systeme	35
2.2.2.2	Internet der Dinge und Dienste	35
2.2.2.3	Digitaler Schatten & Digitaler Zwilling	36
2.2.2.4	Cloud- und Edge-Computing	38
2.2.3	Smart Factory	39
2.2.4	Softwaresysteme	41
2.3	Data Analytics	45
2.3.1	Begriffsdefinition und Abgrenzung	46
2.3.1.1	Data Science	46
2.3.1.2	Data Analytics	46
2.3.1.3	Data Mining	46
2.3.1.4	Big Data	47
2.3.1.5	Business-Intelligenz und Business-Analytics	47
2.3.1.6	Künstliche Intelligenz	48
2.3.1.7	Maschinelles Lernen	48
2.3.1.8	Smart Data	49
2.3.2	Datenmanagement	50
2.3.2.1	Definition der relevanten Begrifflichkeiten	51
2.3.2.2	Eigenschaften eines Datenbankmanagementsystems	52
2.3.2.3	Datenmodelle als Basis für Datenbankmanagementsysteme	53
2.3.2.4	Aufbau und Modellierung eines Datenbankmanagementsystems	54
2.3.2.5	Data Lake und Data Warehouse	55
2.3.3	Methoden der Datenanalyse und -verarbeitung	57
2.3.4	Vorgehensmodelle	59
2.3.4.1	Datenlebenszyklus	59
2.3.4.2	Datenbasierte Prozessoptimierung	60
2.3.4.3	CRISP-DM - Standardprozess für Data Mining	61
2.3.4.4	Smart-Data-Management	62
2.4	Handlungsbedarf aus der Praxis	63

3	Analyse bestehender Ansätze	73
3.1	Bewertungssystematik	73
3.1.1	Bewertungssystem	73
3.1.2	Anforderungssystem	74
3.1.2.1	Anforderungsdimension Betrachtungsbereich Werkzeugbau	75
3.1.2.2	Anforderungsdimension Ganzheitliches Datenmodell	76
3.1.2.3	Anforderungsdimension Systematische Datenerfassung und -erklärung ...	78
3.1.2.4	Anforderungsdimension Datenanalyse und -auswertung	80
3.1.2.5	Anforderungsdimension Datenbasierte Anwendungsfälle	82
3.2	Beschreibung und Bewertung bestehender Ansätze	84
3.2.1	“Low-Cost” Tools Through Life Cycle Observation	84
3.2.2	Lebenszyklusorientierte Leistungssysteme	86
3.2.3	Internet of Production	88
3.2.4	Total Tool Cost of Ownership Indicator within the Cutting Tool Life Cycle	91
3.2.5	Data Driven Die Casting Smart Factory Solution	93
3.2.6	Digital Twin of a Cutting Tool	97
3.2.7	Datenbasiertes Wissensmanagement im Werkzeugbau	100
3.2.8	Infrastruktur zur digitalen Vernetzung im Werkzeugbau	103
3.2.9	Data-Driven Identification of Remaining Life for Plastic Injection Molds	105
3.3	Aggregation der Bewertung	109
3.4	Handlungsbedarf aus der Theorie	111
3.5	Detaillierung der Forschungsfrage	111
4	Konzeption des Gestaltungsmodells	115
4.1	Grundlagen der Modellbildung	115
4.1.1	Systemtheorie	116
4.1.2	Modelltheorie	117
4.2	Merkmale des Gestaltungsmodells	121
4.2.1	Reales System	121
4.2.2	Zielsetzung des Gestaltungskonzepts	123
4.2.3	Zielgruppe des Gestaltungsmodells	124
4.2.4	Zeitraum der Nutzung	124

4.3	Konzeption des Gestaltungskonzepts	125
4.3.1	Ordnungsrahmen für das Gestaltungsmodell	125
4.3.2	Strukturelement Digitale Werkzeugakte.....	127
4.3.3	Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement	128
4.3.4	Aktivitätselemente	129
4.3.4.1	Instanzbasierte Datenerfassung	131
4.3.4.2	Bauteilspezifische Datenanalyse	131
4.3.4.3	Datenbasierte Use Cases.....	132
4.4	Synthese des Gestaltungskonzepts	133
4.5	Zwischenfazit	134
5	Detaillierung der Gestaltungsfelder	139
5.1	Strukturelement Digitale Werkzeugakte	139
5.1.1	Grundlagen	141
5.1.2	Systematische Bedarfsableitung	143
5.1.3	Ableitung benötigter Werkzeugdaten und -kostenfaktoren.....	151
5.1.4	Zuordnung benötigter Datenquellen	159
5.1.5	Ableitung einer anforderungsgerechten Datenstruktur.....	161
5.2	Aktivitätselemente.....	167
5.2.1	Instanzbasierte Datenerfassung	167
5.2.1.1	Grundlagen	168
5.2.1.2	Prozessschritte zur Aufnahme der Werkzeugdaten und -kosten.....	172
5.2.1.3	Identifikation möglicher Fehlerquellen sowie Anforderungsableitung	173
5.2.1.4	Ableitung eines anforderungsgerechten Erfassungskonzeptes.....	180
5.2.2	Bauteilspezifische Datenanalyse	185
5.2.2.1	Grundlagen	187
5.2.2.2	Identifikation des anwenderabhängigen Informationsbedarfs	187
5.2.2.3	Ableitung Datenbedarf & Iterative Weiterentwicklung der Datenstruktur ..	190
5.2.2.4	Entwicklung standardisierter Analyseszenarien	196
5.2.2.5	Ableitung anforderungsgerechter Kennzahlen	209
5.2.3	Datenbasierte Use Cases.....	217

5.2.3.1	Grundlagen	218
5.2.3.2	Identifikation von Use Cases	220
5.2.3.3	Systematische Konzeption und Ausdetaillierung der Use Cases	225
5.2.3.4	Qualitative und quantitative Bewertung nach Nutzen und Aufwand	231
5.2.3.5	Priorisierung der Use Cases und Ableitung einer Roadmap	237
5.3	Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement	239
5.3.1	Grundlagen	241
5.3.2	Identifikation der relevanten Wissensinkremente	250
5.3.3	Verknüpfung der Wissensinkremente mit der Werkzeuginstanz	255
5.3.4	Nutzerfreundliche Dokumentation und bedarfsgerechter Wissensabruf	261
5.4	Wechselwirkungen der Gestaltungselemente	266
6	Verifizierung anhand von Fallbeispielen	269
6.1	Fallbeispiel 1: Hilti AG	269
6.1.1	Ausgangssituation	269
6.1.2	Anwendung	270
6.1.3	Fazit	273
6.2	Fallbeispiel 2: PWO AG	274
6.2.1	Ausgangssituation	274
6.2.2	Anwendung	275
6.2.3	Fazit	277
6.3	Kritische Reflexion	278
7	Zusammenfassung und Ausblick	281
8	Anhang	285
VII	Literaturverzeichnis	293

III Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
ATM	Automated Teller Machine
AV	Arbeitsvorbereitung
BD	Big Data
BI	Business Intelligence
CAD	Computer Aided Design
CAQ	Computer-Aided-Quality
CNC	Computerized Numerical Control
CPPS	Cyber-Physisches Produktionssystem
CPS	Cyber-Physisches System
CPU	Central Processing Unit
CRISP-DM	Cross Industry Standard Process for Data Mining
CRM	Customer-Relationship-Management
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DIN	Deutsches Institut für Normung
EiP	Excellence in Production
ERM	Entity-Relationship-Model
ERP	Enterprise Resource Planning System
e. V.	eingetragener Verein
FA	Fertigungsauftrag
FEM	Finite-Elemente-Methode
FMEA	Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse

IaaS	Infrastructure as a Service
IIoT	Industrial Internet of Things
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IoS	Internet of Services
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
IP	Internetprotokoll
IQ	Informationsqualität
IS	Informationssystem
IT	Informationstechnologie
KBM	Konsortialbenchmarking
KDD	Knowledge Discovery in Databases
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittelständige Unternehmen
KPI	Key Performance Indicator
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LCC	Life Cycle Costs
LISA	Line Information System Architecture
MES	Manufacturing Execution System
ML	Machine Learning
NFC	Near Field Communication
NoSQL	Not only Structured Query Language
OEE	Overall Equipment Effectiveness

OPC UA	OPC-Unified Architecture
PaaS	Platform as a Service
PCA	Principal-Component-Analysis
PLM	Product-Lifecycle-Management
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RFID	Radio-Frequency-Identification
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SDM	Smart-Data-Management
SaaS	Software as a Service
SPS	Speicherprogrammierbares System
SQL	Structured Query Language
TEC	Total Efficiency Control
TTCO	Total Tool Cost of Ownership
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
WZL	Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

IV Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wissenschaftssystematik	6
Abbildung 2: Forschungsmethodisches Vorgehen	8
Abbildung 3: Heuristischer Bezugsrahmen	9
Abbildung 4: Aufbau der Arbeit im Kontext der Phasen angewandter Forschung	11
Abbildung 5: Internationale Werkzeugbaumärkte	16
Abbildung 6: Leistungsspektrum im Werkzeugbau	17
Abbildung 7: Übersicht Leistungsangebot Werkzeugbau nach Umsatzanteilen	19
Abbildung 8: Prozesskette des Werkzeugbaus in der industriellen Wertschöpfungskette	20
Abbildung 9: Grundmaßnahmen der Instandhaltung	23
Abbildung 10: Beeinflussung der Kundenprozesse durch den Werkzeugbau	24
Abbildung 11: Sechs Hauptphasen im Lebenszyklus eines Produkts	25
Abbildung 12: Übersicht der Werkzeuglebenszyklusphasen	26
Abbildung 13: Zusammensetzung der Lebenszykluskosten	27
Abbildung 14: Lebenszykluskostenstruktur nach VDMA 34160	27
Abbildung 15: Werkzeuglebenszykluskostenverteilung	29
Abbildung 16: Stufen des Industrie 4.0 Entwicklungspfad	32
Abbildung 17: Leitbild 2030 für Industrie 4.0	33
Abbildung 18: Abschätzung der Nutzenpotenziale der Smart Factory	40
Abbildung 19: Referenzarchitektur IoP	41
Abbildung 20: Software- und Datenebene der Referenzarchitektur IoP	42
Abbildung 21: Struktur von ERP-Systemen	44

Abbildung 22: Eigenschaften von Big Data.....	47
Abbildung 23: Transformation von Big Data in Smart Data	50
Abbildung 24: Begriffslandschaft rund um den Begriff Data Analytics	50
Abbildung 25: Ebenen für die Entwicklung eines relationalen Datenbanksystems	55
Abbildung 26: Unterschiede in der Nutzung von Data Warehouse und Data Lake.....	56
Abbildung 27: Abgrenzung Data-Lake und Data-Warehouse.....	57
Abbildung 28: Datenbasierte Prozessoptimierung	61
Abbildung 29: CRISP-DM Modell Aufbau	62
Abbildung 30: SDM-Modell für Smart-Data-Management	63
Abbildung 31: KBM – Existenz und Bekanntheit der Werkzeuginstandhaltungsstrategie	65
Abbildung 32: KBM – Verteilung der Werkzeuginstandhaltungsmaßnahmen	66
Abbildung 33: KBM – Gründe Kostenabweichung	67
Abbildung 34: KBM – Identifikation kritischer Teile & Dokumentation von Ausfallgründen	68
Abbildung 35: KBM – Festlegung & Nachbesprechung Ersatzteilmengen	69
Abbildung 36: KBM – Ebene der Datenerfassung.....	70
Abbildung 37: KBM – Werkzeuge zur Datenauswertung & Datenbasierte Use Cases	71
Abbildung 38: Handlungsbedarf aus der Praxis	72
Abbildung 39: Harvey-Balls zur Visualisierung der Bewertung.....	74
Abbildung 40: Herleitung der inhaltlichen Anforderungsdimensionen	75
Abbildung 41: Übersicht Anforderungsdimensionen	83
Abbildung 42: Konfigurationsbildschirm des RCCT-Tools.....	85
Abbildung 43: Bewertung “Low-Cost” Tools Through Life Cycle Observation	86
Abbildung 44: Methodik zur Gestaltung von lebenszyklusorientierten Leistungssystemen ...	86

Abbildung 45: Bewertung der Methodik lebenszyklusorientierte Leistungssysteme	88
Abbildung 46: Das IoP als Dateninfrastruktur für Industrie 4.0.....	89
Abbildung 47: Bewertung des Ansatzes Internet of Production.....	90
Abbildung 48: Darstellung der IT-Architektur	92
Abbildung 49: Bewertung TTCO Indicator within the Cutting Tool Life Cycle	93
Abbildung 50: Grundidee der datengetriebenen Smart Factory für die Druckgussfertigung ..	94
Abbildung 51: Modell zur Vorhersage der Qualität der Druckgussproduktion	95
Abbildung 52: Konzept der Druckguss Smart Factory.....	95
Abbildung 53: Bewertung Data Driven Die Casting Smart Factory Solution.....	97
Abbildung 54: Unterschiedliche Werkzeugtypen und Zusammenbauten.....	97
Abbildung 55: Digitaler Zwilling eines Zerspanungswerkzeugs.....	99
Abbildung 56: Bewertung Digital Twin of a Cutting Tool	100
Abbildung 57: Gestaltungsmodell für das Datenbasierte Wissensmanagement	101
Abbildung 58: Bewertung des Datenbasierten Wissensmanagements im Werkzeugbau	103
Abbildung 59: Zielbild des digital vernetzten Werkzeugbaus	104
Abbildung 60: Bewertung IT-Infrastruktur zur digitalen Vernetzung im Werkzeugbau	105
Abbildung 61: Darstellung der sechs Lebenszykluszustände.....	106
Abbildung 62: Prozentuale Häufigkeit der elf Hauptfehlerquellen	106
Abbildung 63: Bewertung Data-Driven Identification of Remaining Useful Life	108
Abbildung 64: Aggregierte Übersicht der bewerteten Ansätze	109
Abbildung 65: Struktur und Aufbau eines Systems	117
Abbildung 66: Basisoperationen der Abstraktion	118
Abbildung 67: Prozess und Operationen der Modellierung	119

Abbildung 68: Darstellung der vier unterschiedlichen Modellarten	120
Abbildung 69: Mögliche Ausprägungen des realen Systems	122
Abbildung 70: Kernelemente des Gestaltungsmodells	127
Abbildung 71: Gestaltungselement Digitale Werkzeugakte	128
Abbildung 72: Gestaltungselement Übergreifendes Wissensmanagement	129
Abbildung 73: Gestaltungselement Instanzbasierte Datenerfassung	131
Abbildung 74: Gestaltungselement Bauteilspezifische Datenanalyse	132
Abbildung 75: Gestaltungselement Datenbasierte Use Cases	133
Abbildung 76: Gestaltungsmodell datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse	134
Abbildung 77: Anforderungen datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse	135
Abbildung 78: Aspekte des Gestaltungselements Digitale Werkzeugakte	140
Abbildung 79: Prozess zur Ermittlung der Lebenszykluskosten	141
Abbildung 80: Prozess für die Entwicklung eines LCC-Modells	142
Abbildung 81: Vorgehen für die systematische Bedarfsableitung	143
Abbildung 82: Mögliche lebenszyklusdatenorientierte Entscheidungen	144
Abbildung 83: Entscheidungshilfe zur LCC-Analyse	145
Abbildung 84: Beispielhafte Zielbilder für die Werkzeuglebenszykluskostenanalyse	146
Abbildung 85: Drei Kategorien Komponente, Baugruppe, Komplettwerkzeug	147
Abbildung 86: Kosten- und Performancetransparenz auf Typ- oder Instanzebene	148
Abbildung 87: Übersicht Werkzeuglebenszyklusphasen inkl. möglicher Subphasen	149
Abbildung 88: Betriebsumgebung entlang des Werkzeuglebenszyklus	150
Abbildung 89: Bestandteile der Lebenszykluskosten im Maschinen- und Anlagenbau	152
Abbildung 90: Kostenpositionen während der drei Werkzeuglebenszyklusphasen	153

Abbildung 91: Prozessschritte Entwicklung LCC-Modell	154
Abbildung 92: Lebenszykluskostenstruktur nach DIN EN 60300-3-3	155
Abbildung 93: LCC-Modell – Zielsetzung, Rahmenbedingung, Umsetzung	156
Abbildung 94: Ursache-Wirkungs-Diagramm zur Streuung bei Standmengen/-zeiten	158
Abbildung 95: Beispiel Werkzeugdaten – Streuung bei Standmengen/-zeiten eines Typs..	159
Abbildung 96: Beispiel LCC-Modell – Zuordnung Datenquellen.....	159
Abbildung 97: Beispiel Werkzeugdaten – Zuordnung Datenquellen.....	160
Abbildung 98: Systemübersicht für das Beispiel Werkzeugdaten	160
Abbildung 99: Systemübersicht inklusive Kritikalität	161
Abbildung 100: Relation Werkzeuge.....	162
Abbildung 101: Notation Relationenmodell	163
Abbildung 102: Vorgehen Datenstrukturentwicklung	164
Abbildung 103: Beispielhafte Datenstruktur	166
Abbildung 104: Aspekte des Gestaltungselements Instanzbasierte Datenerfassung	168
Abbildung 105: IQ-Dimensionen in vier IQ-Kategorien.....	169
Abbildung 106: Vorgehen zur Untersuchung der vorliegenden Daten.....	171
Abbildung 107: Flowchart Modellierungselemente.....	172
Abbildung 108: Flowchart Beispiel - Werkzeuglager.....	173
Abbildung 109: Ziele, Anwendungsmöglichkeiten und Randbedingungen für eine FMEA...175	
Abbildung 110: Beispiel für Prozess-FMEA für das Fokuselement Werkzeugnutzung	176
Abbildung 111: Voraussetzungen für ein erfolgreiches Datenanalyse-Projekt	178
Abbildung 112: Rahmenbedingungen in der Branche Werkzeugbau	179
Abbildung 113: Anforderungen an den Datenerhebungsprozess im Werkzeugbau	180

Abbildung 114: Verknüpfung Werkzeug-ID und FA-Nummer.....	182
Abbildung 115: Netzdiagramm zum Vergleich von BI-Tools	184
Abbildung 116: Datenampel zur Visualisierung der Informationsqualität.....	185
Abbildung 117: Aspekte des Gestaltungselements Bauteilspezifische Datenanalyse	186
Abbildung 118: Identifikation des anwenderabhängigen Informationsbedarfs.....	187
Abbildung 119: Identifikation Informationsbedarf – Phase der Datensammlung.....	189
Abbildung 120: Identifikation Informationsbedarf – Phase der Datenanalyse.....	190
Abbildung 121: Vorgehen zur Ableitung des notwendigen Datenbedarfs.....	191
Abbildung 122: Morphologischer Kasten zur Klassifizierung des Datensatzes	196
Abbildung 123: Übersicht und Reihenfolge der zwei standardisierten Analyseszenarien....	197
Abbildung 124: Drei Hauptaspekte der Grobanalyse	197
Abbildung 125: Vier Aspekte der Feinanalyse	201
Abbildung 126: Trade-off zwischen Interpretierbarkeit und Performance	203
Abbildung 127: Kennzahlen der Anlagenebene	213
Abbildung 128: Kennzahlen der Werkzeugebene	215
Abbildung 129: Kennzahlen der Produktebene.....	216
Abbildung 130: Aspekte des Gestaltungselements Datenbasierte Use Cases.....	217
Abbildung 131: Beispiel Use Case Diagramm	219
Abbildung 132: Beziehungen zwischen Use Cases	220
Abbildung 133: Vorgehen zur Identifikation von Use Cases	221
Abbildung 134: Haupttätigkeiten entlang des Werkzeuglebenszyklus.....	222
Abbildung 135: Potenzial 1 und 2 inkl. Kurzbeschreibung	223
Abbildung 136: Perspektiven auf die datenbasierten Use Cases.....	224

Abbildung 137: Kategorisierung der datenbasierten Use Cases	224
Abbildung 138: Use Case 1 - Werkzeugstandort	225
Abbildung 139: Systematische Konzeption und Ausdetaillierung der Use Cases.....	226
Abbildung 140: Visualisierung der Abhängigkeiten zwischen den Use Cases	229
Abbildung 141: Mögliche Ausbaustufen für den Use Case Werkzeugkosten	230
Abbildung 142: Detaillierung von Zielzustand 1 des Use Cases Werkzeugkosten	230
Abbildung 143: Grafische Ergebnisdarstellung der Use Case Bewertung.....	238
Abbildung 144: Ableitung einer Implementierungsroadmap	239
Abbildung 145: Aspekte des Gestaltungselements Übergreifendes Wissensmanagement	240
Abbildung 146: Wissenstreppe nach North.....	243
Abbildung 147: Formen der Wissensumwandlung.....	245
Abbildung 148: Wissensspirale.....	247
Abbildung 149: Kernprozesse des Wissensmanagements	248
Abbildung 150: Vorgehen zur Identifikation der relevanten Wissensinkremente	251
Abbildung 151: Leitfragen zur Definition von Wissenszielen	252
Abbildung 152: Beispiele für Wissensziele im Anwendungskontext.....	252
Abbildung 153: Wissensarten entlang der Prozesskette des Werkzeugbaus Teil I	253
Abbildung 154: Wissensarten entlang der Prozesskette des Werkzeugbaus Teil II	254
Abbildung 155: Wissensverknüpfung auf Typ- und Instanzebene.....	256
Abbildung 156: Digitale Wissensplattform - Organisationssicht	260
Abbildung 157: Beispiele für standardisierte Rollenprofile inkl. Rechtemanagement	261
Abbildung 158: Aspekte einer nutzerfreundlichen Wissensdokumentation	262
Abbildung 159: Aspekte eines bedarfsgerechten Wissensabrufs.....	264

Abbildung 160: Wechselwirkungen der Gestaltungselemente	268
Abbildung 161: Status quo Konzeptions- und Umsetzungsgrad Hilti AG	274
Abbildung 162: Status quo Konzeptions- und Umsetzungsgrad PWO AG	278
Abbildung 163: Gestaltungsmodell datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse ...	283
Abbildung 164: KBM – Mitarbeitende im Werkzeugbau	285
Abbildung 165: KBM – Mitarbeitende Werkzeuginstandhaltung	285
Abbildung 166: KBM – Detaillierungsgrad der Datenerfassung	285
Abbildung 167: KBM – Instandhaltungskosten metallverarbeitende Werkzeuge	286
Abbildung 168: KBM – Instandhaltungskosten kunststoffverarbeitende Werkzeuge	286
Abbildung 169: KBM – Zuständigkeit Datenauswertung	287
Abbildung 170: KBM – Verwendung Wissensmanagement	287
Abbildung 171: Potenzial 3 inkl. Kurzbeschreibung	288
Abbildung 172: Potenzial 4 inkl. Kurzbeschreibung	288
Abbildung 173: Potenzial 5 inkl. Kurzbeschreibung	288
Abbildung 174: Potenzial 6 inkl. Kurzbeschreibung	288
Abbildung 175: Potenzial 7 inkl. Kurzbeschreibung	289
Abbildung 176: Potenzial 8 inkl. Kurzbeschreibung	289
Abbildung 177: Potenzial 9 inkl. Kurzbeschreibung	289
Abbildung 178: Potenzial 10 inkl. Kurzbeschreibung	289
Abbildung 179: Potenzial 11 inkl. Kurzbeschreibung	290
Abbildung 180: Potenzial 12 inkl. Kurzbeschreibung	290
Abbildung 181: Potenzial 13 inkl. Kurzbeschreibung	290
Abbildung 182: Potenzial 14 inkl. Kurzbeschreibung	290

Abbildung 183: Potenzial 15 inkl. Kurzbeschreibung	291
Abbildung 184: Potenzial 16 inkl. Kurzbeschreibung	291
Abbildung 185: Potenzial 17 inkl. Kurzbeschreibung	291
Abbildung 186: Potenzial 18 inkl. Kurzbeschreibung	291
Abbildung 187: Use Case 2 – Dashboard in der Produktionsumgebung.....	292

V Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Lernverfahren	49
Tabelle 2: Definition der IQ-Kriterien	170
Tabelle 3: Kriterien zur Bewertung der Informationsqualität	171
Tabelle 4: Klassifizierung der Datenpunkte des Datenerhebungsprozesses	174
Tabelle 5: Soll-Klassifizierung Datenerhebungspunkt Grund Maschinenstillstand	177
Tabelle 6: Beispielhafte Filtermöglichkeiten	210
Tabelle 7: Berechnung der OEE-Kennzahl	211
Tabelle 8: Kriterien zur Status quo Bewertung	227
Tabelle 9: Kriterien zur Status-quo Bewertung der Kategorie Aufnahme	228
Tabelle 10: Kriterien zur Status-quo Bewertung der Kategorie Visualisierung	228

VI Formelverzeichnis

Formel 1: Relative Bewertung des Nutzens je Use Case.....	233
Formel 2: Relative Bewertung des Aufwands je Use Case	234
Formel 3: Normierung der qualitativen Bewertung.....	235
Formel 4: Berechnung der Amortisationszeit	237

1 Einleitung

Im Rahmen des ersten Kapitels wird zunächst die grundsätzliche Ausgangssituation der Industrie beschrieben. Im zweiten Schritt folgt ein Übertrag der Problemstellung auf die Branche Werkzeugbau als zentraler Betrachtungsfokus dieser Dissertation. Basierend darauf wird im nächsten Schritt die Zielstellung sowie die zentrale Forschungsfrage abgeleitet. Abschließend werden der zur Lösung der Forschungsfrage angewendete Forschungsansatz sowie der Aufbau der Arbeit erläutert.

1.1 Ausgangssituation

Eine Säule der deutschen Wirtschaft ist die produzierende Industrie mit einem Anteil von 24 % an der Bruttowertschöpfung im Jahr 2022.¹ In der Vergangenheit konnten sich deutsche Unternehmen insbesondere im Bereich der Premium und Hochtechnologie erfolgreich im internationalen Wettbewerb differenzieren.² Die Exportquote bezogen auf Waren belief sich im Jahr 2022 auf 41 %, bezogen auf Waren und Dienstleistungen auf 51 % des Brutto Inlandprodukts (BIP).³ Der Erfolg der produzierenden Industrie ist bekannt durch das Siegel „Made in Germany“ und beruht auf einem, im Vergleich zu anderen Hochtechnologiestandorten, hohen Ausbildungsniveau.⁴ In den vergangenen Jahren hat sich das Wettbewerbsumfeld für deutsche Unternehmen jedoch zunehmend verschärft. Insbesondere Unternehmen in den Exportmärkten treten zunehmend als direkte Konkurrenten auf und bieten vergleichbar hochwertige Leistungen in Bezug auf die Produkte sowie den Produktionsprozess an.⁵ Ein Vorteil der Schwellenländer liegt in den signifikant geringeren Lohnkosten.⁶ Das Resultat kann im World Competitiveness Ranking abgelesen werden. Unter den 64 größten Volkswirtschaften belegt Deutschland heute nur noch den 22. Platz.⁷

Produzierende Unternehmen am Wirtschaftsstandort Deutschland stehen angesichts der beschriebenen Ausgangssituation vor der Herausforderung, innovative Produkte kosteneffizient produzieren zu müssen. Als Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Serienfertigung ist der Werkzeugbau ein zentraler Befähiger einer leistungsfähigen produzierenden Industrie.⁸ Als solcher sieht er sich mit der notwendigen Überwindung der drei zentralen Herausforderungen einer zunehmenden Produktderivatisierung, einer Verkürzung von Produktlebenszyklen sowie günstigeren Faktorkosten globaler Wettbewerber konfrontiert.⁹ Das Zusammenspiel der beiden Herausforderungen zunehmende Produktderivatisierung sowie Verkürzung von Pro-

¹ Vgl. Statistisches Bundesamt (Wichtige Indikatoren zu Industrie, Handel und Dienstleistungen), 2023.

² Vgl. Federowski; Pflanz (Zwischen Hochtechnologie und Handwerkskunst), 2017, S. 11-12.

³ Vgl. Statistisches Bundesamt (Globalisierungsindikatoren), 2023.

⁴ Vgl. Geis-Thöne (Bildungsstand der Bevölkerung im europäischen Vergleich), 2023, S. 24.; Vgl. Boos et al. (Tooling in Germany 2020), 2020, S. 4.

⁵ Vgl. Lisowski (Das asiatische Jahrhundert - dreht sich die Welt falsch?), 2019, S. 35-45.

⁶ Vgl. International Labour Office (Global Wage Report 2022-23), 2022, S. 35-89.

⁷ Vgl. International Institute for Management Development (World Competitiveness Booklet 2023), 2023, S. 36.

⁸ Vgl. Holmes et al. (Innovation in the automotive tool, die and mould industry), 2005, S. 125-129.; Vgl. Klocke et al. (Zukunftsstudie Werkzeug- und Formenbau), 2005, S. 15.

⁹ Vgl. Schuh et al. (Der Werkzeugbau im Wandel), 2012, S. 72-74.

duktlebenszyklen führen zu einem Anstieg der Produktvielfalt sowie der Komplexität der Produkte und Produktionsprozesse. Die produzierte Menge je Variante nimmt entsprechend ab, wohingegen die Anzahl an zu produzierenden Varianten zunimmt.¹⁰ Bezogen auf die Gesamtkosten eines Produkts nehmen die Werkzeugkosten aufgrund der abnehmenden Produktionsstückzahlen je Derivat dementsprechend einen zunehmend größeren Anteil ein.¹¹ Das Budget je Werkzeug sinkt folglich, was den Werkzeugbau zwingt, seine Werkzeuge kostengünstiger anbieten zu müssen.¹² Ein zunehmend aggressiveres Wettbewerbsumfeld erschwert die Marktsituation für den Werkzeugbau zusätzlich. Insbesondere Marktbegleiter aus Niedriglohnländern sowie deren signifikant günstigeren Faktorkosten stellen eine Herausforderung dar.¹³

Dem zunehmenden Kostendruck für qualitativ hochwertige Werkzeuge können Werkzeugbaubetriebe in Hochlohnländern jedoch nicht durch eine Reduzierung der Einstandspreise begegnen.¹⁴ Dahingegen birgt die Analyse und Auswertung der Lebenszykluskosten eines Werkzeugs die Möglichkeit, die Werkzeugkosten je produziertem Teil zu senken. Dazu ist es jedoch zunächst notwendig, Transparenz über die Werkzeugkosten sowie die beeinflussenden Faktoren entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus zu erhalten. Voraussetzungen sind eine Integration des Werkzeugbaus in die Wertschöpfungsprozesse des Kunden sowie eine ganzheitliche digitale Vernetzung. Auf dieser Basis kann in Kooperation mit dem Kunden spezifisches Werkzeug- und Produktionswissen aufgebaut und für eine systematische Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten eingesetzt werden.¹⁵ Deutsche Werkzeugbaubetriebe benötigen dazu konkrete Lösungsansätze für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Hierdurch kann die Entwicklung und Umsetzung eines dringend benötigten Differenzierungsmerkmals für Werkzeugbaubetriebe in Hochlohnländern unterstützt und die Wettbewerbsfähigkeit der Branche Werkzeugbau nachhaltig verbessert werden.

1.2 Problemstellung

Das vorhandene Prozesswissen sowie der technologische Fortschritt deutscher Werkzeugbaubetriebe bieten die Möglichkeit, über die Erfassung und Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten einen zusätzlichen Kundennutzen und damit ein Differenzierungsmerkmal gegenüber Marktbegleitern zu schaffen.¹⁶ Große Einsparpotenziale in Bezug auf das Werkzeug-Maschine-System, z. B. die Kombination aus Umformwerkzeug und Presse, ergeben sich insbesondere durch die hohen Beschaffungs-, Instandhaltungs- und Ersatzteilkosten. Speziell Stanz- und Massivumformwerkzeuge zeichnen sich durch hohe Nutzungskosten von oft mehr als 50 % der gesamten Werkzeuglebenszykluskosten aus.¹⁷ In der Vergangenheit fanden

¹⁰ Vgl. Friedli; Schuh (Wettbewerbsfähigkeit der Produktion an Hochlohnstandorten), 2012, S. 11-16.

¹¹ Vgl. Schuh et al. (Synchronisierung im industriellen Werkzeugbau), 2011, S. 375.

¹² Vgl. Schuh et al. (Life-Cycle-Oriented Product-Service-Systems in the Tool and Die Making Industry), 2016, S. 556.

¹³ Vgl. Zwanzig (Taktung der Unikatfertigung am Beispiel des Werkzeugbaus), 2010, S. 24-25.

¹⁴ Vgl. Zwanzig (Taktung der Unikatfertigung am Beispiel des Werkzeugbaus), 2010, S. 24-25.

¹⁵ Vgl. Hienzsch et al. (Forecasting life-cycle costs of high quality tools), 2014, S. 1-2.; Vgl. Schuh et al. („Kostengünstigere“ Werkzeuge durch Lebenszykluskostenbetrachtung), 2013, S. 972-973.

¹⁶ Vgl. Böttjer et al. (Data-Driven Identification of Remaining Useful Life), 2022, S. 434.; Vgl. Schuh et al. („Kostengünstigere“ Werkzeuge durch Lebenszykluskostenbetrachtung), 2013, S. 972.

¹⁷ Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 16-17.

Werkzeuglebenszyklusbetrachtungen wenig Anwendung, da die Lebenszykluskosten und -daten nicht erhoben oder nicht jedem einzelnen Werkzeug bzw. jeder einzelnen Komponente verursachungsgerecht zugeordnet werden konnten.¹⁸ Voraussetzung für eine Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten ist die Schaffung von Kostentransparenz über den gesamten Werkzeuglebenszyklus.¹⁹ Der digitale Schatten schafft diese Kostentransparenz. Dieser beschreibt das hinreichend genaue Abbild der eigenen Prozesse in Produktion, Entwicklung und angrenzenden Bereichen und hat zum Ziel, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten statischen und dynamischen Daten zu schaffen.²⁰ Je umfassender die Datenbasis der Lebenszykluskostenanalyse, umso umfangreicher können Einsparpotenziale im Werkzeugbau sowie der Serienproduktion wahrgenommen werden. Dabei sollten insbesondere die Schnittstelle des Werkzeugbaus zur Serienproduktion sowie die Daten aus der Nutzungsphase des Werkzeugs betrachtet werden, da wie zuvor erläutert ein Großteil der Werkzeuglebenszykluskosten in der Betriebs- und Verwertungsphase während der Nutzung in der Serienproduktion anfällt. Werkzeugbaubetriebe sehen sich dabei häufig mit einer mangelnden Datentransparenz seitens der Serienproduktion konfrontiert.²¹ Sollten die beschriebenen Werkzeuglebenszykluskosten und -daten bereits erhoben werden, fehlt ein Konzept, welches Unternehmen der Branche Werkzeugbau sowie die Kunden des Werkzeugbaus dazu befähigt, alle für die Analyse und Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten benötigten Daten systematisch zu erfassen, auszuwerten und für spezifische Anwendungen entlang des Werkzeuglebenszyklus nutzbar zu machen.

Werkzeugbaubetriebe sollten sich folglich aktiv mit der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse auseinandersetzen, um die Erstellung, Nutzung und Verwertung von Werkzeugen in Zusammenarbeit mit ihren Kunden in Zukunft noch effektiver und nachhaltiger zu gestalten und damit die eigene Wettbewerbsfähigkeit zu sichern bzw. weiter zu steigern. Ein entsprechend spezifisches Zielbild für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse ist bislang weder in der Theorie noch in der Praxis vorhanden. Ebenso fehlt ein Handlungsleitfaden, der Werkzeugbaubetriebe während der Auslegung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse unterstützt.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

In Bezug auf die vorgestellte Problemstellung ist das übergeordnete Ziel dieser Dissertation die Entwicklung eines Lösungsansatzes zur anforderungsgerechten Nutzung von Potenzialen der digitalen Vernetzung für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Die Anwendung des zu entwickelnden Lösungsansatzes soll insbesondere die Wettbewerbsfähigkeit

¹⁸ Vgl. Schuh et al. ("Low-Cost" Tools Through Life Cycle Observation), 2014, S. 526-530.; Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 16-17.

¹⁹ Vgl. Boos et al. (IT-Infrastruktur zur digitalen Vernetzung im Werkzeugbau), 2021, S. 6-7.; Vgl. Schuh et al. („Kostengünstigere“ Werkzeuge durch Lebenszykluskostenbetrachtung), 2013, S. 972.

²⁰ Vgl. Schuh et al. (Effizientere Produktion mit Digitalen Schatten), 2020, S. 106.; Vgl. Schuh et al. (Keine Industrie 4.0 ohne den Digitalen Schatten), 2016, S. 745.

²¹ Vgl. Brenner et al. (Total Tool Cost of Ownership Indicator), 2018, S. 1406-1408.; Vgl. Schuh et al. ("Low-Cost" Tools Through Life Cycle Observation), 2014, S. 526-530.; Vgl. Schweiger (Nachhaltige Wettbewerbsvorteile für Anbieter und Nutzer von Maschinen/Anlagen), 2009, S. 22-24.

von Werkzeugbaubetrieben an Hochlohnstandorten wie beispielsweise Deutschland nachhaltig steigern.²²

Obwohl die Potenziale der Lebenszykluskostenanalyse sowie die zur Umsetzung notwendigen Bestandteile von Industrie 4.0 konkret für die Branche Werkzeugbau beschrieben werden, kann keine signifikante Anwendung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse verzeichnet werden.²³ Ursächlich dafür ist, dass bisher keine Lösungsansätze existieren, die unter Berücksichtigung der werkzeugbauspezifischen Charakteristika der Einzel- und Kleinserienfertigung die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse systematisch und ganzheitlich beschreiben.

Nach KUBICEK ist es für eine effektive und effiziente Forschung notwendig, den Betrachtungsbereich eindeutig einzugrenzen, indem die Zielsetzung der Forschungsarbeit konkret benannt wird.²⁴ Die konkrete Zielsetzung dieser Arbeit lautet wie folgt:

Entwicklung eines Modells zur Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse, das strukturelle Anforderungen sowie aktuelle Herausforderungen der Branche Werkzeugbau berücksichtigt und offen adressiert.

1.4 Forschungsansatz der Arbeit

Der Forschungsansatz beruht auf dem allgemeinen Forschungsverständnis des Lehrstuhls für Produktionssystematik am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University. Die Ausarbeitungen bereits verfasster Dissertationen am Lehrstuhl für Produktionssystematik dienen als Basis für die wissenschaftlichen Grundlagen des Forschungsansatzes. Konkret orientiert sich dieser Arbeit an den Dissertationen von PITSCH²⁵, SALMEN²⁶, SCHULTES²⁷ und STRACHE²⁸.

Gemäß BINDER und KANTOWSKY kann die wissenschaftliche Forschung als ein Prozess zur Erkenntnisgewinnung beschrieben werden. Die gesammelten Erkenntnisse der Forschung werden der Forschungs- bzw. Wissensgemeinschaft als eine neue Wirklichkeit zur Verfügung gestellt. Da der wissenschaftliche Erkenntnisprozess aufgrund eines nicht näher begründbaren Wertesystems des Forschenden subjektiven Charakter aufweist, ist zur Veröffentlichung der neuen Erkenntnisse vorab die Erkenntnisperspektive des Forschenden zu erläutern.²⁹

²² Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 16-17.

²³ Vgl. Boos et al. (IT-Infrastruktur zur digitalen Vernetzung im Werkzeugbau), 2021, S. 9-17.

²⁴ Vgl. Kubicek (Heuristische Bezugsrahmen), 1977, S. 24-26.

²⁵ Vgl. Pitsch (Kompetenzfeldbasierte Vernetzung von Werkzeugbaustandorten), 2014, S. 4-8.

²⁶ Vgl. Salmen (Gestaltungsmodell für den digital vernetzten Shopfloor im Werkzeugbau), 2016, S. 4-8.

²⁷ Vgl. Schultes (Gestaltungsmodell zur digitalen Vernetzung von Werkzeugbaubetrieben mit Lieferanten), 2019, S. 4-7.

²⁸ Vgl. Stracke (Gestaltungsmodell für den vernetzten und synchronisierten Serienanlauf von Werkzeugen), 2020, S. 6-9.

²⁹ Vgl. Binder; Kantowsky (Technologiepotentiale), 1996, S. 3-4.

Bei der Erkenntnisperspektive handelt es sich um ein sogenanntes „belief system“. Dieses ist als grundlegende Überzeugung zu akzeptieren und muss nicht detailliert nachgewiesen werden.³⁰ Um jedoch die intersubjektive Begreifbarkeit der Erkenntnisse des Forschungsprozesses sicherzustellen, ist es notwendig, die grundlegende Erkenntnisperspektive sowie das methodische Vorgehen offenzulegen.³¹ Dazu wird die vorliegende Arbeit nachfolgend in das Spektrum der Wissenschaften eingeordnet. ULRICH & HILL unterscheiden grundlegend zwischen den Formal- und den Realwissenschaften.³²

Zu den Disziplinen der Formalwissenschaften zählen unter anderem die Mathematik, die Logik und die Philosophie. Ihre Aussagen sind analytisch und rein theoretischer Natur. Folglich können Sie in der Praxis weder beobachtet noch widerlegt werden. Die Richtigkeit der Aussagen kann ausschließlich durch das Suchen nach logischen Widersprüchen erfolgen.³³

Im Gegensatz zu den Formalwissenschaften wird mit den Realwissenschaften das Ziel verfolgt, empirisch wahrnehmbare Wirklichkeitsausschnitte zu beschreiben, zu erklären und zu gestalten.³⁴ Für die Überprüfung der synthetischen Aussagen ist zusätzlich zur Suche nach logischen Widersprüchen eine Faktenanalyse durchzuführen.³⁵ Die Realwissenschaften können in die reinen Grundlagenwissenschaften und die angewandten Handlungswissenschaften unterteilt werden. Während mit den Grundlagenwissenschaften, zu denen die Naturwissenschaften wie Physik, Chemie und Biologie zählen, der Versuch unternommen wird, empirische Wirklichkeitsausschnitte zu erklären und ein theoretisches Ziel zu verfolgen, liegt der Fokus bei den angewandten Handlungswissenschaften auf der Untersuchung des Verhaltens und Handelns einzelner Menschen, Gruppen sowie ganzer Gesellschaften. Den Handlungswissenschaften können beispielsweise die Betriebswirtschaftslehre und die Sozialwissenschaften wie beispielsweise die Soziologie zugeordnet werden.³⁶

Auch die Ingenieurwissenschaften können den Realwissenschaften zugeordnet werden. Sie können jedoch weder eindeutig den reinen Grundlagenwissenschaften noch eindeutig den angewandten Handlungswissenschaften zugeordnet werden.³⁷ Diese ingenieurwissenschaftliche Dissertation ist aufgrund des hohen Praxisbezugs und der methodischen Bearbeitung eines Problems des menschlichen Handelns den Handlungswissenschaften zuzuordnen. Die Arbeit weist zudem Schnittmengen zur Betriebswirtschaftslehre auf. In der nachfolgenden Abbildung 1 ist die erläuterte Wissenschaftssystematik sowie die Einordnung der Ingenieurwissenschaften abgebildet.

³⁰ Vgl. Guba; Lincoln (Competing paradigms in qualitative research), 1994, S. 107.

³¹ Vgl. Binder; Kantowsky (Technologiepotentiale), 1996, S. 3.

³² Vgl. Ulrich; Hill (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1976, S. 305.

³³ Vgl. Ulrich; Hill (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1976, S. 305.

³⁴ Vgl. Ulrich; Hill (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1976, S. 305.

³⁵ Vgl. Schanz (Wissenstheoretische Grundfragen der Führungsforschung), 1987, S. 2039.

³⁶ Vgl. Ulrich; Hill (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1976, S. 305.

³⁷ Vgl. Schultes (Gestaltungsmodell zur digitalen Vernetzung von Werkzeugbaubetrieben mit Lieferanten), 2019, S. 5.; Vgl. Salmen (Gestaltungsmodell für den digital vernetzten Shopfloor im Werkzeugbau), 2016, S. 6.

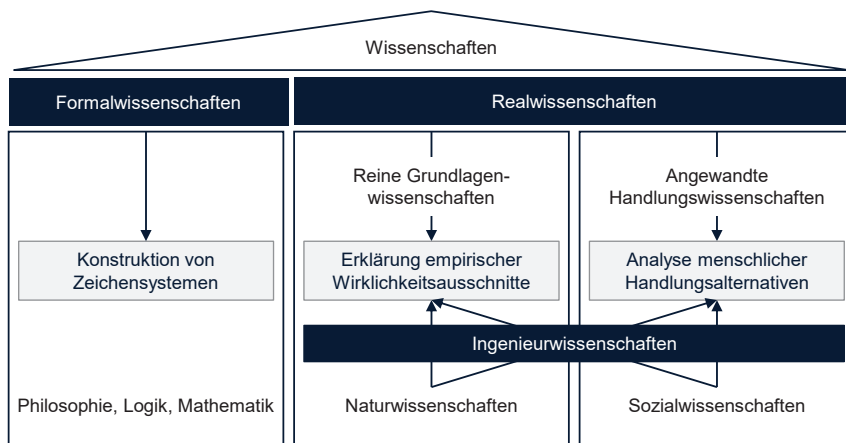


Abbildung 1: Wissenschaftssystematik³⁸

Auf die Zuordnung der vorliegenden Arbeit zu den angewandten Handlungswissenschaften folgt die Definition der grundlegenden Erkenntnisperspektive. Dazu wird nachfolgend erläutert, welche vorwissenschaftlichen und wertgebundenen Annahmen als Basis dieser Arbeit dienen.³⁹ Das sogenannte Subjektivitätskriterium wissenschaftlicher Arbeiten wird mit dieser Offenlegung außer Kraft gesetzt.⁴⁰ In der Wissenschaftstheorie werden die Überzeugungen des Forschers⁴¹ und das damit zusammenhängende Grundverständnis auch als Paradigma bezeichnet.⁴² In der Betriebswirtschaftslehre existieren drei relevante Paradigmen, die nachfolgend kurz angeführt werden. Zum einen existieren der entscheidungstheoretische Ansatz nach HEINEN⁴³ und zum anderen der faktortheoretische Ansatz nach GUTENBERG⁴⁴. Darüber hinaus gibt es den Systemansatz nach ULRICH & HILL⁴⁵. Als grundlegende Wissenschaftstheorie dieser Arbeit wird der Systemansatz nach ULRICH & HILL verwendet. Ausschlaggebend für diese Wahl ist, dass der Ansatz nach ULRICH & HILL integrativ, offen und praxisnah ist. Damit weist dieser Ansatz eine besondere Nähe zu den Ingenieurwissenschaften auf.⁴⁶

Der Forschungsprozess wird neben der zuvor erläuterten grundlegenden Erkenntnisperspektive insbesondere durch die Forschungsmethodologie definiert.⁴⁷ Der zur Entwicklung neuer Lösungen und Entdeckung neuen Wissens notwendige Erkenntnisprozess wird mithilfe der Forschungsmethodologie beschrieben. Dazu wird insbesondere beschrieben, auf welche Art

³⁸ i.A.a. Ulrich; Hill (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1976, S. 305.

³⁹ Vgl. Pitsch (Kompetenzfeldbasierte Vernetzung von Werkzeugbaustandorten), 2014, S. 6.

⁴⁰ Vgl. Ulrich; Hill (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1976, S. 306.

⁴¹ Falls geschlechterneutrale Bezeichnungen nicht verwendet werden können, wird aufgrund der besseren Lesbarkeit im Text das generische Maskulinum verwendet. Gemeint sind jedoch immer alle Geschlechter

⁴² Vgl. Kuhn (Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen), 1988, S. 25.

⁴³ Vgl. Heinen (Entwicklungstendenzen in der entscheidungsorientierten Betriebswirtschaftslehre), 1971, S. 89.

⁴⁴ Vgl. Gutenberg (Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1951, S. 3.

⁴⁵ Vgl. Ulrich; Hill (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1976, S. 307-308.

⁴⁶ Vgl. Ulrich; Hill (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1976, S. 308-309.

⁴⁷ Vgl. Schultes (Gestaltungsmodell zur digitalen Vernetzung von Werkzeugbaubetrieben mit Lieferanten), 2019, S. 6.; Vgl. Pitsch (Kompetenzfeldbasierte Vernetzung von Werkzeugbaustandorten), 2014, S. 6-7.

und Weise die Gestaltung des Erkenntnisprozesses stattfindet.⁴⁸ Der Erkenntnisgewinn beginnt nach Popper mit der Wahrnehmung, Beobachtung oder Sammlung von Problemen und nicht, wie angenommen werden könnte, mit der Wahrnehmung, Beobachtung oder Sammlung von Daten oder Tatsachen.⁴⁹ Die identifizierten Probleme sollen anschließend mithilfe der angewandten Handlungswissenschaften gelöst werden.

Aufgrund ihrer Zuordnung zu den angewandten Handlungswissenschaften sowie der Wahl des Systemansatzes nach ULRICH & HILL orientiert sich diese Dissertation an der Forschungsmethodologie der explorativen Forschung, die nachfolgend erläutert wird. Die Zielsetzung der explorativen Forschung ist die Erarbeitung von theoretischen Aussagen und analytischen Lösungen auf Basis von systemseitigem Erfahrungswissen.⁵⁰ Der Forschungszyklus nach TOMCZAK bildet die dafür notwendige inhaltliche Grundlage. Er wird nachfolgend erläutert und abschließend dargestellt.⁵¹

Bei einem explorativen Forschungsvorhaben werden wissenschaftliche Ergebnisse in einem iterativen Prozess entwickelt, der auf systematischem Erfahrungswissen aufbaut. Die Generierung neuer Erkenntnisse basiert dabei sowohl auf der Verarbeitung dazu gewonnener Erkenntnisse als auch auf der Rückführung der Erkenntnisse in die Fragestellung. Dieses Vorgehen ermöglicht somit die Abfrage und Überprüfung zwischen Theorie und Praxis.⁵²

Die Generierung neuer Erkenntnisse kann dabei in drei unterschiedliche Gruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe bilden indirekte Erfahrungen bspw. auf Basis dokumentierter Studien oder Berichte. Direkte qualitative Erfahrungen bspw. durch die Durchführung von Industrieprojekten oder Experteninterviews bilden die zweite Gruppe. Die abschließende dritte Gruppe bilden direkte quantitative Erfahrungen bspw. durch die systematische Durchführung und Auswertung von Experimenten oder Benchmarkings.⁵³ Das zuvor erläuterte forschungsmethodische Vorgehen basierend auf dem Forschungszyklus nach TOMCZAK und KUBICEK ist in der nachfolgenden Abbildung 2 dargestellt.

⁴⁸ Vgl. Schultes (Gestaltungsmodell zur digitalen Vernetzung von Werkzeugbaubetrieben mit Lieferanten), 2019, S. 6.; Vgl. Salmen (Gestaltungsmodell für den digital vernetzten Shopfloor im Werkzeugbau), 2016, S. 7.

⁴⁹ Vgl. Popper (Die Logik der Sozialwissenschaften), 1975, S. 104.

⁵⁰ Vgl. Kubicek (Heuristische Bezugsrahmen), 1977, S. 13.

⁵¹ Vgl. Tomczak (Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft.), 1992, S. 84.

⁵² Vgl. Tomczak (Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft.), 1992, S. 84.; Vgl. Kubicek (Heuristische Bezugsrahmen), 1977, S. 13-14.

⁵³ Vgl. Tomczak (Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft.), 1992, S. 83-85.

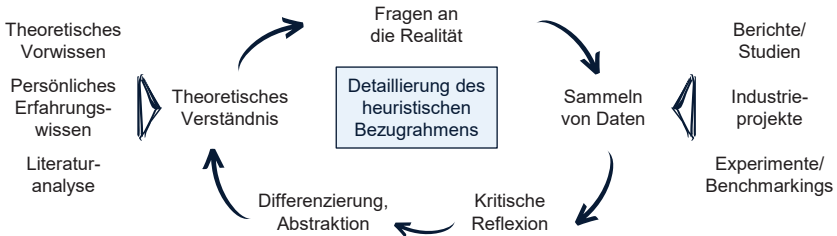


Abbildung 2: Forschungsmethodisches Vorgehen⁵⁴

Der heuristische Bezugsrahmen bildet den Mittelpunkt des Forschungsprozesses, lenkt den Forschungsprozess anhand praxisrelevanter Problemstellungen und ist aus den relevanten Analyseelementen sowie deren Beziehungen aufgebaut. Den Kern bildet ein ungeklärtes Problem oder ein Phänomen.⁵⁵ Der heuristische Bezugsrahmen bildet die Problemstellung aufgrund der bereits erläuterten Subjektivität entsprechend dem Vorverständnis des Autors ab. Im Rahmen dieser Arbeit ist dies die in Kapitel 1.1 hergeleitete Problemstellung.

Der heuristische Bezugsrahmen dieser Arbeit umfasst sechs Teile, die nachfolgend vorgestellt werden. Die Basis bilden die Werkzeuglebenszykluskosten, mit deren Betrachtung die nachhaltige Leistungsfähigkeit und die Positionierung der Branche Werkzeugbau im globalen Wettbewerb gesteigert werden soll. Für die Erfassung und Verknüpfung der Werkzeuglebenszykluskosten sind die Potenziale von Industrie 4.0 zu nutzen. Dazu wird der digitale Schatten⁵⁶ des Werkzeugs über den gesamten Werkzeuglebenszyklus benötigt. Für die systematische Analyse und Auswertung der Werkzeugkosten über den gesamten Lebenszyklus des Werkzeugs wird die Werkzeuglebenszykluskostenanalyse eingesetzt, die spezifisch auf die Besonderheiten der Branche Werkzeugbau und Formenbau zugeschnitten ist. Die beiden Voraussetzungen Werkzeuglebenszykluskostenanalyse und Digitaler Schatten sind direkt miteinander verbunden und stellen in Kombination den Kern des Gestaltungsmodells zur datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse dar. In der nachfolgenden Abbildung 3 ist der zuvor vorgestellte heuristische Bezugsrahmen dargestellt.

⁵⁴ i.A.a. Tomczak (Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft:), 1992, S. 84.; i.A.a. Kubicek (Heuristische Bezugsrahmen), 1977, S. 14.

⁵⁵ Vgl. Tomczak (Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft:), 1992, S. 84.

⁵⁶ Eine genaue Definition erfolgt in Kapitel 2.2.2.3

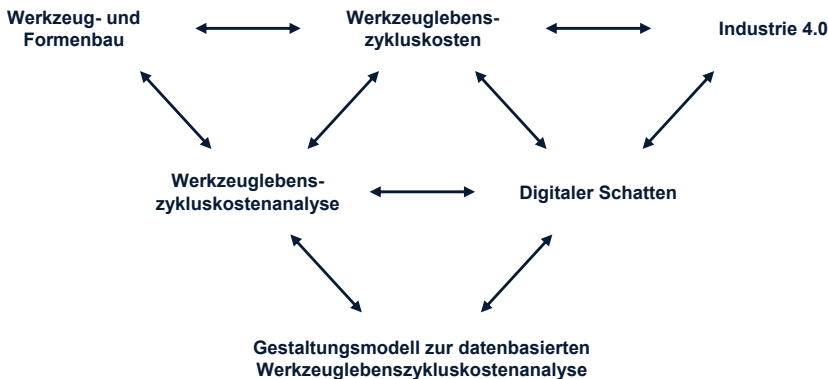


Abbildung 3: Heuristischer Bezugsrahmen⁵⁷

Neben dem theoretischen Verständnis ist wie zuvor vorgestellt die Generierung neuer Erkenntnisse ein relevanter Aspekt des forschungsmethodischen Vorgehens. Da der Autor sich im Rahmen seiner wissenschaftlichen Arbeit regelmäßig mit der Thematik dieser Dissertation befasst und entsprechend sowohl direkte quantitative und qualitative Erfahrungen als auch indirekte Erfahrungen gesammelt hat, wird nachfolgend der relevante Hintergrund des Autors sowie die Bereiche, in denen er praktisches Erfahrungswissen sammeln konnte, vorgestellt.

Während seiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssystematik des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen hat der Autor im Rahmen von zahlreichen Forschungs- und Industrieprojekten sowie Lehr- und Weiterbildungsveranstaltungen seit 2019 das genannte Erfahrungswissen aufgebaut. Einen tiefen Einblick in die Strukturen des Werkzeugs erlaubte darüber hinaus die Leitung von nationalen und internationalen Industrieprojekten zur strategischen Ausrichtung, zur effizienten Werkzeuginstandhaltung sowie zur datenbasierten Analyse des Werkzeuglebenszyklus. Die Fragestellungen der digitalen Vernetzung von Werkzeugbau und Serienproduzent, die digitale Abbildung des Werkzeugbereitstellungs-, Werkzeugnutzungs- und Werkzeugausmusterungsprozesses in einem digitalen Schatten sowie die Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten sind im Rahmen zahlreicher Vorträge, Workshops, Forschungsprojekte, Seminare und Arbeitskreise vorgestellt und diskutiert worden. Ergänzend ist ein intensives Studium der forschungsrelevanten Literatur durchgeführt worden. Bereits bestehende Ansätze zur datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse sind kritisch reflektiert und weiterentwickelt worden. Die ausgiebige Verifizierung des in dieser Arbeit beschriebenen Gestaltungsmodells zur datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse ist im intensiven Austausch mit Experten aus der Praxis sowie der Theorie erfolgt.

⁵⁷ i.A.a. Kubicek (Heuristische Bezugsrahmen), 1977, S. 17-20.

1.5 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit orientiert sich an den definierten Phasen angewandter Forschung nach ULRICH & HILL. Die Erfassung eines relevanten Praxisproblems bildet den Ausgangspunkt. Für die Ableitung von Beurteilungskriterien, Gestaltungsregeln und Gestaltungsmodellen wird das erfasste Problem sowohl wissenschaftstheoretisch als auch im Anwendungszusammenhang untersucht. Die auf diese Weise abgeleiteten Gestaltungsregeln und -modelle werden anschließend durch eine Überprüfung in der Praxis für eine Implementierung vorbereitet.⁵⁸ Nachfolgend werden darauf aufbauend die sieben Kapitel dieser Arbeit eingeführt.

Aufbauend auf das erste Kapitel folgt im zweiten Kapitel die Erläuterung der für diese Arbeit relevanten Grundlagen. Zunächst wird die Branche Werkzeugbau als der Gestaltungs- und Betrachtungsbereich dieser Arbeit vorgestellt und relevante Begrifflichkeiten, die Branchen- und Leistungsstruktur, die Wertschöpfung und Kundeninteraktion im Werkzeugbau sowie die Themen Werkzeuglebenszyklusphasen und Werkzeuglebenszykluskosten beschrieben. Im zweiten Unterkapitel wird der Themenkomplex Industrie 4.0 mit den Unterpunkten relevante Begrifflichkeiten, technologische Befähiger, Smart Factory und Softwaresysteme eingeführt und erklärt. Das dritte Unterkapitel bildet das Thema Data Analytics und umfasst die Themen Begriffsdefinitionen und Abgrenzungen, Datenmanagement, Methoden der Datenanalyse und Vorgehensmodelle zur Datenanalyse. Das Kapitel schließt mit der Herleitung des Handlungsbedarfs aus der Praxis. Das dritte Kapitel enthält die Analyse und Bewertung bestehender Ansätze zur datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Als Grundlage der Bewertung erfolgt zunächst die Definition von Anforderungen sowie die Entwicklung eines Bewertungssystems. Danach werden bestehende Ansätze vorgestellt und bewertet. Darauf aufbauend erfolgt abschließend die Herleitung des Handlungsbedarfs aus der Theorie sowie die Detaillierung der Forschungsfrage.

Im Rahmen des vierten Kapitels wird das Gestaltungsmodell für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse konzeptioniert. Im Detail werden die Grundlagen wissenschaftstheoretischer Konzeption erläutert, die grundlegenden Merkmale des Gestaltungsmodells definiert, die einzelnen Elemente des Gestaltungsmodells hergeleitet und die Synthese des Modells sowie eine kritische Reflexion des Modells durchgeführt. Das fünfte Kapitel umfasst die detaillierte Ausgestaltung des Gestaltungsmodells. Dazu werden die einzelnen Gestaltungselemente und -aspekte im Detail beschrieben sowie die Wechselwirkungen zwischen den Gestaltungselementen erläutert.

Im sechsten Kapitel wird das entwickelte Gestaltungsmodell anhand von zwei Fallbeispielen im Anwendungszusammenhang validiert. Dazu werden zunächst jeweils kurz die Unternehmen sowie Ausgangssituationen vorgestellt und anschließend die Anwendung des Gestaltungsmodells beschrieben. Im letzten Schritt werden die in Kapitel drei definierten Anforderungen auf das entwickelte Modell angewendet und die Erfüllung der Anforderungen überprüft. Im siebten Kapitel werden die Ergebnisse der Dissertation zusammengefasst und ein Ausblick auf die Implikationen des Betrachtungsbereichs sowie mögliche weitere Forschungsansätze

⁵⁸ Vgl. Ulrich (Management), 1984, S. 193.

gegeben. In der nachfolgenden Abbildung 4 sind die eingeführten Phasen der angewandten Forschung im Zusammenhang mit den sieben eingeführten Kapiteln dieser Arbeit dargestellt.

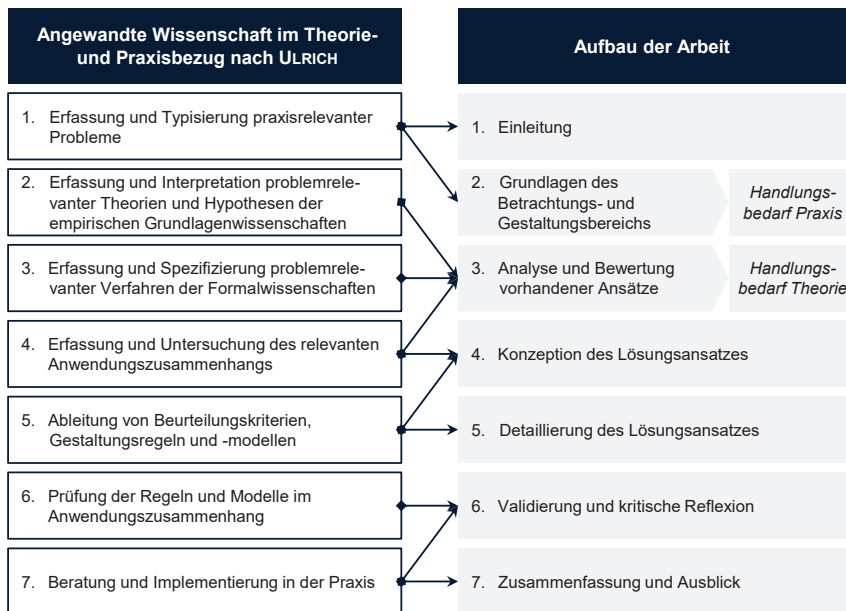


Abbildung 4: Aufbau der Arbeit im Kontext der Phasen angewandter Forschung⁵⁹

⁵⁹ i.A.a. Ulrich (Management), 1984, S. 193.

2 Grundlagen

Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen des Gestaltungs- und Betrachtungsbereichs näher erläutert. Die ersten beiden Phasen der angewandten Forschung nach ULRICH werden wie in Kapitel 1.3 erläutert somit adressiert, da eine Problemstellung aus der Praxis sowie problem-relevante Theorien aus der Wissenschaft erfasst werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die datenbasierte Analyse von Werkzeuglebenszykluskosten gestaltet. Die Grundlagen des Gestaltungsbereichs bilden somit die Vorstellung der Branche Werkzeugbau in Kapitel 2.1, die den Betrachtungsbereich der vorliegenden Arbeit bildet, die Vorstellung des Themenfelds Industrie 4.0 in Kapitel 2.2 sowie eine Einführung in den Themenbereich Data Analytics in Kapitel 2.3. Abschließend wird der Handlungsbedarf aus der Praxis abgeleitet.

2.1 Werkzeugbau

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen des ersten Betrachtungsbereichs Werkzeugbau vorgestellt. Zunächst werden die relevanten Begrifflichkeiten eingeführt und voneinander abgegrenzt. Im Anschluss wird ein Überblick über die Branche gegeben und das Leistungsspektrum des Werkzeugbaus vorgestellt. Danach folgt die Einordnung des Werkzeugbaus in die Wertschöpfungskette produzierender Unternehmen. Abschließend werden die verschiedenen Werkzeuglebenszyklusphasen und die jeweiligen Werkzeugkosten vorgestellt. Die Erläuterungen im ersten Betrachtungsbereich Werkzeugbau folgen dem Verständnis der Abteilung Unternehmensentwicklung des Lehrstuhls für Produktionssystematik am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University. Aufgrund gemeinsam durchgeführter Industrie- und Forschungsarbeiten sowie des gleichen Betrachtungsbereichs basiert die Struktur von Kapitel 2.1 in Teilen auf verschiedenen vorausgegangenen Arbeiten wie z. B. von SCHULTES⁶⁰, STRACKE⁶¹ und BOSHOFF⁶².

2.1.1 Begriffsdefinition und -abgrenzung

Sowohl in der Praxis als auch in der Theorie existiert kein einheitliches Begriffsverständnis für die Begriffe Werkzeug und Werkzeugbau.⁶³ Für die vorliegende Arbeit werden die beiden Begriffe nachfolgend definiert und eingeordnet.

2.1.1.1 Definition Werkzeug

Der Verband Deutscher Ingenieure (VDI) definiert in der zurückgezogenen VDI-Norm 2815 Werkzeuge als Fertigungsmittel, die auf ein bestimmtes Material unmittelbar zum Zweck der Form- und Materialveränderung mechanisch oder physikalisch-chemisch einwirken.⁶⁴ Diese allgemeingültige Definition gilt sowohl für Hohlformwerkzeuge als auch für Standardwerkzeuge

⁶⁰ Vgl. Schultes (Gestaltungsmodell zur digitalen Vernetzung von Werkzeugbaubetrieben mit Lieferanten), 2019, S. 47-66.

⁶¹ Vgl. Stracke (Gestaltungsmodell für den vernetzten und synchronisierten Serienanlauf von Werkzeugen), 2020, S. 28-60.

⁶² Vgl. Boshof (Definition und Auslegung von datenbasierten Dienstleistungen im Werkzeugbau), 2022, S. 47-65.

⁶³ Vgl. Pitsch (Kompetenzfeldbasierte Vernetzung von Werkzeugbaustandorten), 2014, S. 33.

⁶⁴ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2815:1978-05), 1978.

wie z. B. Drehmeißel, Fräsköpfe und Bohrer.⁶⁵ Eine weitere Eingrenzung des Begriffs Werkzeug nehmen EVERSHEIM und KLOCKE vor. Demzufolge werden im Werkzeugbau ausschließlich Hohlformwerkzeuge hergestellt. Charakteristisch ist die teilweise oder vollständige Abbildung der Werkstückform auf der Werkzeuggeometrie.⁶⁶ Beispiele für Hohlformwerkzeuge sind Spritzgießwerkzeuge sowie Blech- und Massivumformwerkzeuge.⁶⁷ Das Hohlformwerkzeug wird stets in Verbindung mit Maschinen und Anlagen eingesetzt. Es ist ein Mittel zur Verrichtung von Arbeit innerhalb der Maschine. Beispiele für eine solche Maschine oder Anlage sind die Produktionspresse oder die Spritzgussmaschine. Da für die Verwendung des Werkzeugs eine Maschine benötigt wird, werden Werkzeuge auch als passive Betriebsmittel bezeichnet.⁶⁸

2.1.1.2 Definition Werkzeugbau

Der Begriff Werkzeugbau bezeichnet Unternehmen oder eine Abteilung eines produzierenden Unternehmens, das hauptsächlich die zuvor beschriebenen Hohlformwerkzeuge herstellt.⁶⁹ Charakteristisch für den Werkzeugbau ist eine kundenindividuelle Anfertigung von komplexen Unikaten.⁷⁰ Zusätzlich zu dem eigentlichen Werkzeug werden auch Betriebsmittel wie z. B. Vorrichtungen, Prüfmittel oder Anlagen gefertigt. Der Werkzeugbau wird aus diesem Grund häufig auch Betriebsmittelbau genannt. Während der Begriff Werkzeugbau die gesamte Branche bezeichnet, steht der Begriff Werkzeugbaubetrieb für ein einzelnes Unternehmen.

Grundsätzlich lässt sich ein Werkzeugbaubetrieb über seinen Marktzugang in die beiden Typen externer oder interner Werkzeugbaubetrieb unterteilen.⁷¹ Der Anteil von externen bzw. internen Werkzeugbaubetrieben an der Gesamtanzahl der Werkzeugbaubetriebe liegt über die letzten Jahren hinweg relativ konstant bei ca. 50 %.⁷²

Externe Werkzeugbaubetriebe sind rechtlich eigenständige Unternehmen. Sie stellen Werkzeuge im Auftrag externer Kunden her und verkaufen sie mit dem Ziel der Gewinnmaximierung.⁷³ Da der externe Werkzeugbaubetrieb in der Regel ein breites Kunden- und Branchenspektrum bedient, kann das Risiko von Auslastungsschwankungen in spezifischen Kundensegmenten besser ausgeglichen werden. Aufgrund der Zusammenarbeit mit vielen Unternehmen und der Bearbeitung unterschiedlichster Aufträge sammelt ein externer Werkzeugbaubetrieb über die Jahre hinweg Erfahrungen im Hinblick auf Problemlösung und Fertigungsmöglichkeiten verschiedener Werkzeugtypen. Das dadurch aufgebaute spezielle Wissen kann ein entscheidendes Differenzierungskriterium gegenüber der Konkurrenz sein.⁷⁴

⁶⁵ Vgl. Canis (Tool and Die Industry), 2012, S. 1-2.

⁶⁶ Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 25.

⁶⁷ Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 26.

⁶⁸ Vgl. Bode (Betriebliche Produktion Von Information), 1993, S. 84.

⁶⁹ Vgl. Brankamp (Wettbewerbsfaktor Werkzeug- und Betriebsmittelbau), 1991, S. 5.

⁷⁰ Vgl. Boos (Methodik zur Gestaltung und Bewertung von modularen Werkzeugen), 2008, S. 41.

⁷¹ Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 3.

⁷² Vgl. Gemeinsame Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie IPT, 2022.

⁷³ Vgl. Boos (Methodik zur Gestaltung und Bewertung von modularen Werkzeugen), 2008, S. 28.; Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 3-4.

⁷⁴ Vgl. Spennemann (Gestaltung von Organisationsstrukturen im Werkzeugbau), 2001, S. 12.

Der interne Werkzeugbaubetrieb ist ein fester Bestandteil der Aufbauorganisation eines übergeordneten Unternehmens.⁷⁵ Seine Aufgabe besteht aus der Versorgung des Unternehmens mit Werkzeugen für die Serienproduktion. Das Gesamtunternehmen agiert sowohl als Auftraggeber als auch als Kapitalgeber.⁷⁶ Obgleich der interne Werkzeugbaubetrieb vollständig im Unternehmen integriert ist, bietet er häufig ebenfalls Leistungen am freien Markt an. Die primäre Zielsetzung eines internen Werkzeugbaubetriebs besteht jedoch in der Sicherstellung der Produktionsverfügbarkeit und der Steigerung der Gesamtproduktivität des übergeordneten Unternehmens. Zudem bietet ein interner Werkzeugbaubetrieb die Möglichkeit, das eigene Know-how zu schützen, unabhängig von externen Anbietern zu agieren und organisatorische Schnittstellen zu reduzieren und zu optimieren.⁷⁷ Für einen internen Werkzeugbau existieren verschiedene Integrationsmöglichkeiten in die Aufbauorganisation des Mutterunternehmens. Darunter zählen die Abteilung, das Cost-Center oder das Profit-Center.⁷⁸ Als Abteilung steht die Gewinnmaximierung des Werkzeugbaubetriebs nicht im Vordergrund. Die Kosten werden vollständig durch das Mutterunternehmen, das auch der einzige Kunde des Werkzeugbaubetriebs ist, getragen. Als Cost-Center verantwortet der Werkzeugbaubetrieb seine Kosten eigenständig und steht in Konkurrenz mit unternehmensexternen Anbietern. Gleichzeitig kann er seine Leistungen auch anderen Firmen als dem Mutterunternehmen anbieten. Als Profit-Center verfolgt der Werkzeugbaubetrieb das Ziel der Gewinnmaximierung. Auch wenn das Mutterunternehmen weiterhin als Kapitalgeber fungiert, wird das Profit-Center als ein eigenständig auf dem Markt agierendes Unternehmen betrachtet.⁷⁹

2.1.2 Branchenstruktur

Im Folgenden soll die Branchenstruktur des Werkzeugbaus vorgestellt werden. Übergeordnet lässt sich der weltweite Werkzeugbau nach BOOS ET AL. in die vier Kategorien Rising Stars, Rookies, Established und Allstars zusammenfassen, wobei die zwei Bewertungsmerkmale Kompetenz und Marktgröße bezogen auf ein Land angewendet werden. Unter Allstars werden solche Werkzeugbaumärkte verstanden, die sowohl eine hohe Werkzeugbaukompetenz sowie eine große Marktgröße haben. In der Kategorie Established sind Werkzeugbaumärkte einsortiert, die über eine sehr hohe Werkzeugbaukompetenz verfügen, aber lediglich eine mittlere Marktgröße haben. Die Kategorie Rookies zeichnet sich durch eine mittelhohe Werkzeugbaukompetenz und eine geringe Marktgröße aus. Werkzeugbaumärkte in der Kategorie Rising Stars haben sowohl eine geringe Werkzeugbaukompetenz als auch eine geringe Marktgröße. Sowohl Märkte der Kategorie Rising Stars als auch der Kategorie Established zeichnen sich durch eine positive Marktentwicklung aus. In der nachfolgenden Abbildung 5 sind die 26 relevantesten Werkzeugbaumärkte den beschriebenen Kategorien zugeordnet.⁸⁰

⁷⁵ Vgl. Spennemann (Gestaltung von Organisationsstrukturen im Werkzeugbau), 2001, S. 12.

⁷⁶ Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 3-7.

⁷⁷ Vgl. Zwicker (Kostenfaktor oder Erfolgsgeheimnis), 2009, S. 13.

⁷⁸ Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 4.

⁷⁹ Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 75-79.

⁸⁰ Vgl. Boos et al. (World of Tooling), 2022, S. 10.

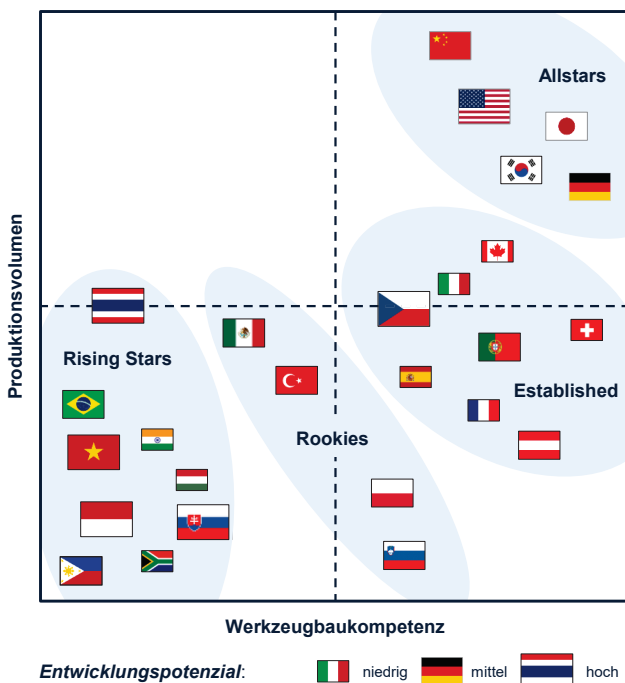


Abbildung 5: Internationale Werkzeugbaumärkte⁸¹

Der deutsche Werkzeugbaumarkt gehört der Kategorie Allstars an. Er zählt weltweit zu den bedeutendsten Märkten in Bezug auf die Werkzeugerstellung sowie die Werkzeugnutzung in der Serienproduktion.⁸² Da sich die vorliegende Arbeit vornehmlich an Anwendende aus dem deutschen Werkzeugbaumarkt richtet, wird dieser nachfolgend detaillierter vorgestellt. Die deutsche Branche Werkzeugbau ist mittelständisch geprägt und zeichnet sich durch eine ausgesprochen starke Heterogenität und Fragmentierung aus. Über 80 % der insgesamt ca. 3.800 Werkzeugbaubetriebe in Deutschland haben weniger als 20 Mitarbeitende. Weniger als 1 % haben mehr als 100 Mitarbeitende. Nur einige wenige interne Werkzeugbaubetriebe der Automobilindustrie und anderer produzierender Großunternehmen haben zum Teil (z. T.) mehr als 1.000 Beschäftigte. Insgesamt arbeiten gegenwärtig ca. 54.000 Personen in der deutschen Werkzeugbaubranche. Nach einem starken Umsatzwachstum zwischen den Jahren 2010 bis 2018 bedingte die Covid-19 Pandemie im Jahr 2020 einen großen Umsatzeinbruch. 2021 stieg der Umsatz trotz anhaltend schwieriger Bedingungen wieder um 12 %. Das Produktionsvolumen belief sich im Jahr 2020 auf 3,7 Mrd. €. Dabei entfielen ca. 40 % auf die Herstellung von Spritzgießwerkzeugen sowie ca. 49 % auf die Herstellung von Blech- und Massivumformwerkzeugen. Die verbleibenden 11 % entfielen auf Druckgusswerkzeuge. In Deutschland genügt

⁸¹ Vgl. Boos et al. (World of Tooling), 2022, S. 15.

⁸² Vgl. Boos et al. (World of Tooling), 2022, S. 11.

die Branche Werkzeugbau in Bezug auf die Werkzeugqualität und -komplexität den höchsten Ansprüchen. Besonders hochpreisige und hochkomplexe Blech- und Massivumformwerkzeuge für die Automobilindustrie werden nach wie vor in Deutschland gefertigt. Zuverlässige Prozesse und ein effizienter Ressourceneinsatz sind Befähiger für qualitativ hochwertige Werkzeuge mit gutem Preis-Leistungs-Verhältnis.⁸³

2.1.3 Leistungsspektrum

In diesem Unterkapitel wird das Leistungsspektrum des Werkzeugbaus vorgestellt. Zunächst werden die industriellen Sachleistungen und anschließend industrielle Dienstleistungen im Werkzeugbau vorgestellt.

Wie bereits bei der Definition des Werkzeugs in Kapitel 2.1.1.1 erläutert, ist das Kernprodukt des Werkzeugbaus das Hohlformwerkzeug. Es wird in der Regel als Unikat hergestellt und anschließend in der Serienproduktion verwendet. Ähnlich wie die Produkte, die mit Hohlformwerkzeugen hergestellt werden können, ist auch das Werkzeug selbst durch eine große Varianz geprägt. Die Teilezahlen variieren von wenigen hundert bis mehreren tausend Bauteilen. Das Gewicht kann eine Spanne von 100 Kilogramm bis 40 Tonnen einnehmen.⁸⁴ Wesentliche Komplexitätstreiber bei der Herstellung des Werkzeugs sind geringe Toleranzen, eine hohe Oberflächengüte sowie komplizierte Geometrien.⁸⁵ Zusätzlich zu den Hohlformwerkzeugen umfasst das industrielle Leistungsspektrum auch Vorrichtungen und Prüfmittel, Modelle und Prototypen sowie systematische Anwendungen. Zu den unterstützenden Leistungen zählt bspw. die Werkzeuginstandhaltung während der Serienproduktion.⁸⁶ In der nachfolgenden Abbildung 6 ist eine Übersicht des Leistungsspektrums der Branche Werkzeugbau abgebildet.

(Hohlform-) Werkzeuge		Vorrichtungen und Prüfmittel	Modelle und Prototypen	Systematische Anwendungen
Blechverarbeitungswerkzeuge	Kunststoffwerkzeuge	Bearbeitungsvorrichtungen	Ur-/Gießmodelle	Sondermaschinen
Massivumformwerkzeuge	(Druck-) Gießwerkzeuge	Montagevorrichtungen	Designmodell	Automatisierungstechnik
Sonstige Werkzeuge		Prüfmittel	Funktionsmodelle	Anlagen
			Prototypen (-werkzeuge)	
Unterstützende Leistungen				
Engineering/Beratung	Systemlieferung	Prozessüberwachung	Reparatur/Instandhaltung	Teilefertigung/Kleinserien

Abbildung 6: Leistungsspektrum im Werkzeugbau⁸⁷

⁸³ Vgl. Boos et al. (World of Tooling), 2022, S. 31-35.
⁸⁴ Vgl. Klotzbach (Gestaltungsmodell für den industriellen Werkzeugbau), 2007, S. 46.
⁸⁵ Vgl. Klocke; Arntz (Technologien für den Werkzeug- und Formenbau von morgen), 2004, S. 1-3.
⁸⁶ Vgl. Frick (Erfolgreiche Geschäftsmodelle im Werkzeugbau), 2006, S. 20; Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 25.
⁸⁷ Vgl. Frick (Erfolgreiche Geschäftsmodelle im Werkzeugbau), 2006, S. 20; Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 25.

Der Hauptbestandteil des Leistungsspektrums, die Hohlformwerkzeuge, lässt sich in weitere Gruppen unterteilen. Es wird zwischen Blechverarbeitungswerkzeugen, Kunststoffwerkzeugen, Massivumformwerkzeugen, (Druck-)Gießwerkzeugen sowie sonstigen Werkzeugen unterschieden. Blechverarbeitungswerkzeuge können weiter in Stanz-Biegewerkzeuge und Tiefziehwerkzeuge unterteilt werden. Mithilfe von Stanz-Biegewerkzeugen werden Blechteile unter Verwendung der Verfahren des Blechfügens, des Blechzerteilens und des Blechumformens gefertigt. Da die Blechbearbeitung häufig in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten erfolgt, werden Stanz-Biegewerkzeuge häufig als Folgeverbund- oder Transferwerkzeuge ausgelegt.⁸⁸ Zur Fertigung von Hohlkörpern durch Zugdruckumformung von Blechen werden Tiefziehwerkzeuge eingesetzt.⁸⁹ Für das Spritzgießen von Kunststoffartikeln werden Kunststoffwerkzeuge eingesetzt. Das Einsatzspektrum dieser Werkzeuge sowie die Kategorisierungsmöglichkeiten, z. B. nach Artikelwerkstoff oder Verfahren, sind sehr vielfältig.⁹⁰ Zur Herstellung von massiven Werkstücken aus metallischen Werkstoffen werden Massivumformwerkzeuge eingesetzt. Die hohen Prozesskräfte während der Umformung bedingen sehr hohe Anforderungen, z. B. in Bezug auf die Steifigkeit an diese Art von Werkzeugen. Grundsätzlich wird zwischen den Verfahren Kalt- und Warmmassivumformung unterschieden. Bei der Warmmassivumformung wird das Werkstück vor der Umformung zunächst erwärmt. Unabhängig vom eingesetzten Verfahren erfolgt die Umformung in der Praxis häufig in mehreren aufeinanderfolgenden Umformschritten, um höhere Umformgrade zu realisieren.⁹¹ Zur Herstellung von Bauteilen aus schmelzflüssigem Metall werden (Druck-)Gießwerkzeuge eingesetzt. Ähnlich wie bei den Kunststoffwerkzeugen besteht auch hier eine große Werkzeugvielfalt, die auf technologische Unterschiede, unterschiedliche Artikelgeometrien sowie die Materialverfügbarkeit zurückgeführt werden kann. Für den Werkzeugbau stellt insbesondere die thermische Belastung auf die Werkzeuge aufgrund der hohen Schmelztemperaturen von Metallen eine Herausforderung dar.⁹² Alle weiteren Werkzeugtypen, die sich nicht in die vier vorgestellten Kategorien einordnen lassen, werden in der Gruppe sonstige Werkzeuge zusammengefasst. Dazu zählen bspw. Sinter-Pressformen zur Herstellung von Bauteilen aus pulverförmigem, meist metallischem Ausgangsmaterial unter hohem Druck.⁹³ Bezogen auf den Umsatz sind die vorgestellten Umformwerkzeuge mit einem Anteil von 84 % der Hauptbestandteil des Leistungsangebots der Branche Werkzeugbau. In der nachfolgenden Abbildung 7 ist das Leistungsangebot im Werkzeugbau nach Umsatzanteilen dargestellt.

⁸⁸ Vgl. Adam et al. (Handbuch der Umformtechnik), 1996, S. 123-128.

⁸⁹ Vgl. Adam et al. (Handbuch der Umformtechnik), 1996, S. 11-13.

⁹⁰ Vgl. Menges et al. (Spritzgießwerkzeuge), 2007, S. 559-577.

⁹¹ Vgl. Adam et al. (Handbuch der Umformtechnik), 1996, S. 433-440.

⁹² Vgl. Brunhuber (Praxis der Druckgußfertigung), 1991, S. 187-199.

⁹³ Vgl. Bilsing (Kennzahlengestützte Bewertung der technologischen Leistungsfähigkeit), 2007, S. 5.

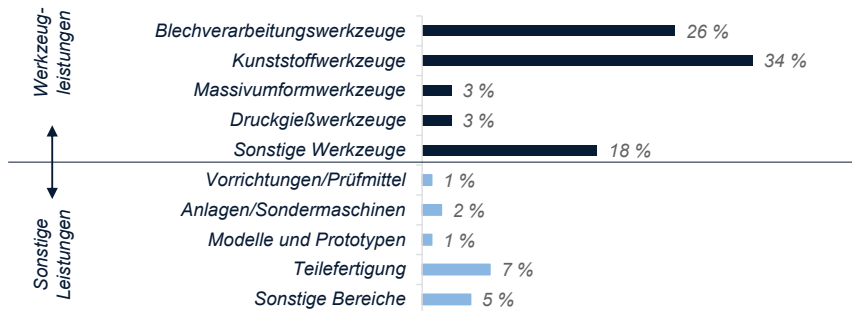


Abbildung 7: Übersicht Leistungsangebot Werkzeugbau nach Umsatzanteilen⁹⁴

Das darüberhinausgehende Leistungsangebot stellt eine Erweiterung zu den Hohlformwerkzeugen dar. Vorrichtungen und Prüfmittel, Modelle und Prototypen, Anlagen und Sondermaschinen sowie die Teilefertigung bilden in der Praxis häufig eine Ergänzung zum eigentlichen Fertigungsauftrag des Werkzeugs. In der Kategorie sonstige Bereiche werden unterstützende Leistungen zusammengefasst, die dem Kunden üblicherweise im Rahmen eines Werkzeugentwicklungs- und -fertigungsauftrags in Form von Dienstleistungen angeboten werden. Dazu zählen bspw. die Beratung des Kunden bei der fertigungsgerechten Produktauslegung oder die Anlaufbegleitung.

Nach EVERSHEIM & KLOCKE kann das zuvor beschriebene Sachleistungsangebot eines Werkzeugbaubetriebs in fünf unterschiedliche Auftragsarten unterteilt werden:⁹⁵

- Neuaufträge
- Änderungsaufträge
- Reparaturaufträge
- Instandhaltungsaufträge
- Sonstige Aufträge

Die unterschiedlichen Auftragsarten unterscheiden sich zum einen bezogen auf die benötigten Kompetenzen sowie zum anderen bezogen auf die notwendigen Wertschöpfungsumfänge für die Leistungserstellung. Für Reparatur- und Instandhaltungsaufträge werden Prozesse, Kompetenzen und Ressourcen lediglich auftragsspezifisch benötigt, während Neu- und Änderungsaufträge den gesamten Auftragsabwicklungsprozess durchlaufen.⁹⁶ Insbesondere Neu- und Änderungsaufträge stellen aufgrund mangelnder Erfahrungswerte hohe Anforderungen an die Kompetenzen der Mitarbeitenden.⁹⁷ Reparaturaufträge bedürfen aufgrund ihrer Kurzfristigkeit einer hohen Flexibilität in der Planung der mechanischen Fertigung und Montage.

⁹⁴ Gemeinsame Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie IPT, 2022.

⁹⁵ i.A.a. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 20.

⁹⁶ Vgl. Pitsch (Kompetenzfeldbasierte Vernetzung von Werkzeugbaustandorten), 2014, S. 41-42.

⁹⁷ Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 24.

2.1.4 Werkzeugbau in der Wertschöpfungskette

Obwohl die Branche Werkzeugbau vergleichsweise klein ist, zählt sie zu den bedeutendsten Industriebranchen in der industriellen Herstellung von Gütern.⁹⁸ An der Schnittstelle zwischen Produktentwicklung und Serienproduktion nimmt der Werkzeugbau eine Schlüsselposition ein und gilt als Befähiger der Serienproduktion.⁹⁹ Er hat einen entscheidenden Einfluss auf die gesamte Wertschöpfungskette produzierender Unternehmen.¹⁰⁰ Nachfolgend wird die Prozesskette des Werkzeugbaus erläutert und eine Übersicht über das typische Leistungsspektrum gegeben. Abschließend werden verschiedene Auftragsarten vorgestellt.

Für die vorliegende Arbeit wird die Prozesskette nach HENSEN verwendet. HENSEN lehnt sich hinsichtlich der Prozesskette des Werkzeugbaus an BOOS¹⁰¹ an und ergänzt diese um den Teilprozess der Serienbetreuung.¹⁰² Grundsätzlich unterscheidet HENSEN die Akteure Kunde, Werkzeugbau und Partner. Zwischen Werkzeugbau und Partner existieren entlang der Prozesskette prozessuale Schnittstellen. Diese liegen insbesondere während der Produktentwicklung sowie während der Betreuung der Serienproduktion vor. Zusätzlich können während der Phase der Werkzeugerstellung weitere Schnittstellen zu Partnern existieren wie z. B. für die externe Vergabe von Wertschöpfungsumfängen. In der nachfolgenden Abbildung 8 ist die generische Prozesskette nach HENSEN dargestellt. Anschließend werden die einzelnen Prozessschritte im Detail vorgestellt.

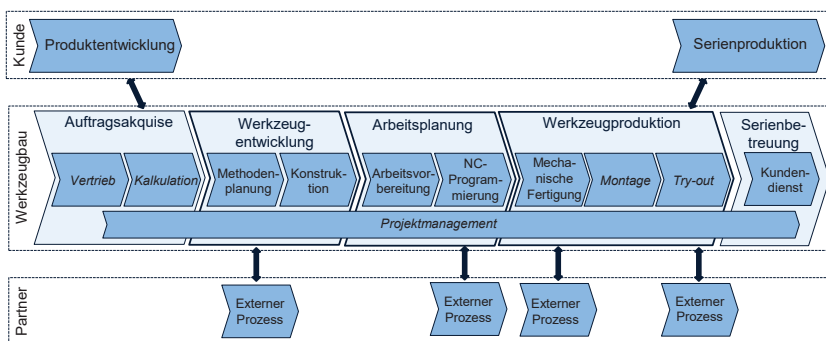


Abbildung 8: Prozesskette des Werkzeugbaus in der industriellen Wertschöpfungskette¹⁰³

Die Aufgabengebiete in der Auftragsakquise können unterteilt werden in die Prozessschritte Vertrieb und Kalkulation. Die Schnittstelle zwischen Werkzeugbaubetrieb und Produktentwicklung wird hauptsächlich vom Vertrieb betreut, wobei der jeweiligen Organisation des Werk-

⁹⁸ Vgl. Boos et al. (Tooling in Germany 2020), 2020, S. 13-15.

⁹⁹ Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 4.

¹⁰⁰ Vgl. Schuh; Varnhagen (Fokus Automobilindustrie), 2013, S. 9.; Vgl. Frick (Erfolgreiche Geschäftsmodelle im Werkzeugbau), 2006, S. 22.

¹⁰¹ Vgl. Boos (Methodik zur Gestaltung und Bewertung von modularen Werkzeugen), 2008, S. 41-44.

¹⁰² Vgl. Hensen (Strategische Auslegung industrieller Werkzeugbaubetriebe), 2017, S. 48.

¹⁰³ Vgl. Hensen (Strategische Auslegung industrieller Werkzeugbaubetriebe), 2017, S. 48.

zeugbaubetriebs entsprechend weitere Funktionsbereiche hinzugefügt werden. Zu den Hauptaufgaben des Vertriebs zählen die Akquise von und die Kommunikation mit dem Kunden, die Bearbeitung eingehender Kundenanfragen, die anschließende Machbarkeitsüberprüfung sowie die Nachbesprechung und -verhandlung mit dem Kunden.¹⁰⁴ Die Kalkulation berechnet den Angebotspreis für den Kunden. Aufgrund des Unikatcharakters der Werkzeuge können dazu lediglich Erfahrungswerte und Referenzprojekte herangezogen werden.¹⁰⁵

Die Werkzeugentwicklung kann in die beiden übergeordneten Tätigkeiten Methodenplanung und Konstruktion unterteilt werden. Die Methodenplanung verantwortet die Festlegung des technologischen Werkzeugkonzepts. Das umfasst den Aufbau des Werkzeugs, die Materialauswahl, die Lage der konstruktiven Elemente wie beispielsweise Stempel und Schieber sowie die Anzahl und Reihenfolge der formgebenden Bearbeitungsschritte.¹⁰⁶ Auf die Konzepterstellung folgt häufig die Simulation. Sobald das Werkzeugkonzept freigegeben ist, beginnt die Konstruktion des Werkzeugs. Dazu werden mit Unterstützung von CAD-Programmen Zeichnungen und Stücklisten angefertigt.¹⁰⁷ Der Konstruktion wird eine große Bedeutung im Auftragsabwicklungsprozess zugeschrieben, da z. B. durch die Festlegung von Fertigungstechnologien bereits ca. 80 % der später anfallenden Kosten indirekt beeinflusst werden.¹⁰⁸

Die Arbeitsplanung teilt sich in die Prozessschritte Arbeitsvorbereitung und NC-Programmierung auf. Die Arbeitsvorbereitung ist verantwortlich für die Termin- und Kapazitätsplanung, die Erstellung der benötigten Arbeitsdokumente sowie den Einkauf von Standardkomponenten. Der Fokus liegt dabei auf der Planung der Abläufe mit dem Ziel, ausreichend Kapazitäten für die im Werkzeugbau üblichen Reparatur-, Wartungs- und Nacharbeitsaufträge zu schaffen. Die Übertragung der Konstruktionsdaten auf die Werkzeugmaschine, mit der das Werkzeug gefertigt wird, wird von der Abteilung NC-Programmierung durchgeführt.¹⁰⁹

Auf die Arbeitsplanung folgt die Werkzeugproduktion, die sich in die drei sequenziellen Arbeitsschritte mechanische Fertigung, Montage und Try-out unterteilt. In der mechanischen Fertigung werden im Wesentlichen mit den fünf Fertigungstechnologien Fräsen, Drahterodieren, Senkerodieren, Drehen und Schleifen die für das Werkzeug benötigten Komponenten gefertigt und zugekaufte Komponenten bearbeitet. Weitere Bearbeitungsschritte werden im Bedarfsfall von externen Lieferanten zugekauft.¹¹⁰ Die Montage ist verantwortlich für den Zusammenbau des Werkzeugs, die anschließende Funktionalitätsprüfung sowie die Nacharbeiten am Werkzeug, die erst im montierten Zustand möglich sind.¹¹¹ Anschließend werden die Werkzeuge im Try-out, das Teil des Technikums ist, getestet und erste Teile mit dem Werkzeug produziert.

¹⁰⁴ Vgl. Klocke et al. (Zukunftsstudie Werkzeug- und Formenbau), 2005, S. 53.

¹⁰⁵ Vgl. Kühn (Lebenszyklusorientierte Leistungssysteme im Werkzeugbau), 2016, S. 44.; Vgl. Boos (Methodik zur Gestaltung und Bewertung von modularen Werkzeugen), 2008, S. 42.

¹⁰⁶ Vgl. Boos (Methodik zur Gestaltung und Bewertung von modularen Werkzeugen), 2008, S. 43.

¹⁰⁷ Vgl. Frick (Erfolgreiche Geschäftsmodelle im Werkzeugbau), 2006, S. 27.

¹⁰⁸ Vgl. Klocke et al. (Zukunftsstudie Werkzeug- und Formenbau), 2005, S. 53.

¹⁰⁹ Vgl. Boos et al. (Erfolgreich Planen und Steuern), 2019, S. 12-17.; Vgl. Boos (Methodik zur Gestaltung und Bewertung von modularen Werkzeugen), 2008, S. 43.

¹¹⁰ Vgl. Boos et al. (Erfolgreich Layout gestalten im Werkzeugbau), 2020, S. 6-8.; Vgl. Ziskoven (Methodik zur Gestaltung und Auftragseinplanung einer getakteten Fertigung im Werkzeugbau), 2013, S. 47.

¹¹¹ Vgl. Warnecke et al. (Montagetechnik), 1975, S. 11.

Diese produzierten Teile werden besonders überprüft und notwendige Änderungen am Werkzeug werden vor Ort oder in der mechanischen Bearbeitung vorgenommen. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis die gewünschte Bauteilqualität erreicht ist.¹¹²

Mit der Übergabe des Werkzeugs in die Serienproduktion wechselt auch das Eigentumsverhältnis. Im Rahmen der Serienbetreuung kann der Werkzeugbau die Kunden weiterhin über den Kundendienst unterstützen. Hierzu zählen industrielle Dienstleistungen wie beispielsweise die Werkzeugreparatur und -instandhaltung oder die Anlaufbegleitung der Serienproduktion.¹¹³

Die Tätigkeiten des Projektmanagements beginnen mit der Auftragserteilung und enden mit der Auslieferung des Werkzeugs an den Kunden. Der Fokus liegt dabei auf der Projektplanung, Projektsteuerung und Projektüberwachung. Verfolgt wird dabei beispielsweise die Erreichung der vorgegebenen Sachziele, die Erfüllung der kalkulierten Kostenziele sowie die Einhaltung des geforderten Fertigstellungstermins. Zudem fungiert das Projektmanagement als Kommunikationsorgan über die Unternehmensgrenzen hinweg.¹¹⁴

2.1.5 Kundeninteraktion im Werkzeugbau

Der Werkzeugbau agiert wie in Kapitel 2.1.4 erläutert an zwei zentralen Kundenschnittstellen. Zum einen agiert der Werkzeugbau mit der Produktentwicklung, die dem Werkzeugherstellungsprozess vorgelagert ist, und zum anderen mit der Serienproduktion, die dem Werkzeugherstellungsprozess nachgelagert ist. Durch die Werkzeugherstellung hat der Werkzeugbau direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der industriellen Wertschöpfungskette. Die Intensität und Qualität der Zusammenarbeit zwischen den vor- und nachgelagerten Prozessen mit dem Werkzeugbau hat somit direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der industriellen Wertschöpfung des Kunden. Wenn die Rolle des Werkzeugbaus nicht nur als Zulieferer von Werkzeugen sondern darüber hinaus als Wissensträger verstanden wird, kann für den Kunden ein nachhaltiger Wettbewerbsvorteil generiert werden.¹¹⁵

In den der Werkzeugherstellung vorgelagerten Prozessen kann der Werkzeugbau die Produktentwicklung sowie die Produktgestaltung beraten, indem er bei der Entwicklung und Umsetzung eines werkzeug- und produktionsgerechten Produktdesigns unterstützt. Dazu ist es notwendig, dass der Werkzeugbau in die Produkt- und Prozessgestaltung des Kunden integriert wird. Mithilfe technischer Machbarkeitsstudien mit konkreten Kostenkalkulationen wird das Produktdesign innovativ zur Erhöhung der Prozessstabilität sowie zur Senkung der Entstehungs- und Lebenszykluskosten des Werkzeugs weiterentwickelt.¹¹⁶ In den der Werkzeugherstellung nachgelagerten Prozessen berät der Werkzeugbau den Anlauf der Serienproduktion und unterstützt die effiziente Werkzeuginstandhaltung. Für den Anlauf der Serienproduktion stellt der Werkzeugbau beispielsweise die Betriebsparameter für das Werkzeug bereit, sodass

¹¹² Vgl. Boos (Methodik zur Gestaltung und Bewertung von modularen Werkzeugen), 2008, S. 44.

¹¹³ Vgl. Hensen (Strategische Auslegung industrieller Werkzeugbaubetriebe), 2017, S. 50.

¹¹⁴ Vgl. Kühn (Lebenszyklusorientierte Leistungssysteme im Werkzeugbau), 2016, S. 44.; Vgl. Klotzbach (Gestaltungsmodell für den industriellen Werkzeugbau), 2007, S. 50.

¹¹⁵ Vgl. Begovic (Datenbasiertes Wissensmanagement für Smart Services im Werkzeugbau), 2017, S. 74-75.

¹¹⁶ Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 99-109.

ein optimales Zusammenspiel zwischen Werkzeug und Produktionsmaschine erreicht werden kann. Vorteile für den Serienproduzenten bestehen in der Reduzierung der Anlaufkosten, der Ausschussquote sowie der Markteinführungszeit. Während der Nutzungsphase des Werkzeugs kann der Werkzeugbau durch die Übernahme der erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen am Werkzeug die Ausbringungsmenge sowie die Produktivität auf Kundenseiten optimieren.¹¹⁷ Entsprechend DIN 31051 können Instandhaltungsmaßnahmen als die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionstüchtigen Zustands oder der Rückführung in diesen verstanden werden. Dazu werden die vier Grundmaßnahmen Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Verbesserung unterschieden. Die vorgestellten Grundmaßnahmen unterscheiden sich durch ihren Einfluss auf den Abnutzungsvorrat und sind in der nachfolgenden Abbildung 9 dargestellt.¹¹⁸

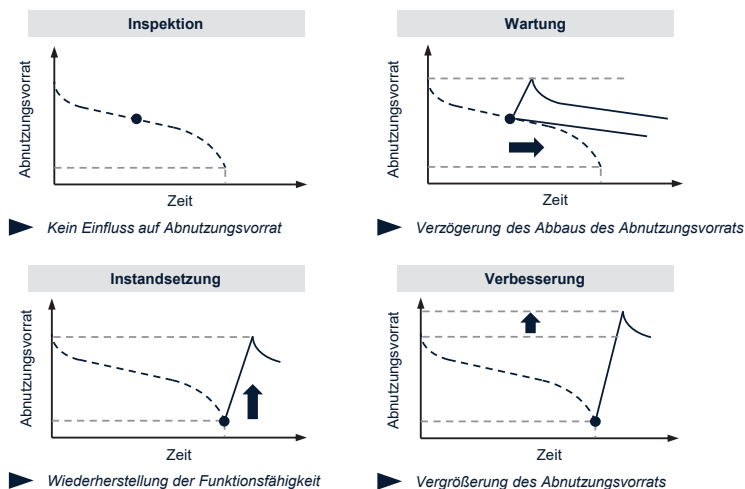


Abbildung 9: Grundmaßnahmen der Instandhaltung¹¹⁹

Die Übersicht der Einflüsse des Werkzeugbaus auf die Kundenprozesse ist in der nachfolgenden Abbildung 10 dargestellt.

¹¹⁷ Vgl. Schuh; Varnhagen (Fokus Automobilindustrie), 2013, S. 25.

¹¹⁸ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN ISO 31051), 2019-06, S. 4.

¹¹⁹ Eigene Darstellung

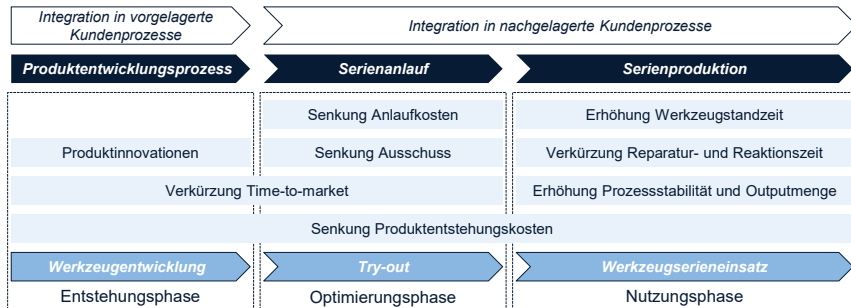


Abbildung 10: Beeinflussung der Kundenprozesse durch den Werkzeugbau¹²⁰

Insbesondere für den Hochlohnstandort Deutschland bietet die Integration der Werkzeugbaubetriebe in die vor- und nachgelagerten Kundenprozesse ein erhebliches Potential zur Wettbewerbsdifferenzierung. Auf diese Weise können zum einen neue Geschäftsfelder erschlossen und zum anderen die Wissensbasis des Werkzeugbaus kontinuierlich erweitert werden, um die eigene Leistungsfähigkeit nachhaltig zu steigern und auch in Zukunft anforderungsgerechte Werkzeuge für den Kunden herzustellen.¹²¹ Die Potenziale der Datenaufnahme, -analyse und -auswertung während den Phasen der Werkzeugbereitstellung, -nutzung und -auswertung werden zukünftig die Notwendigkeit einer stärkeren Integration des Werkzeugbaus in die vor- und nachgelagerten Kundenprozesse zur Konsequenz haben.¹²²

2.1.6 Werkzeuglebenszyklusphasen

Nachdem detailliert der Werkzeugbau, das Leistungsspektrum und die Prozesskette des Werkzeugbaus sowie die Kundeninteraktion vor, während und nach der eigentlichen Leistungserstellung vorgestellt worden sind, folgt in diesem Kapitel die Vorstellung der unterschiedlichen Lebenszyklusphasen eines Werkzeugs sowie der dazugehörigen Tätigkeiten. Die Kenntnis der verschiedenen Werkzeuglebenszyklusphasen bildet die Grundlage für die Ermittlung und Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten, auf die im nächsten Unterkapitel 2.1.7 detailliert eingegangen wird. Bevor konkret auf die verschiedenen Werkzeuglebenszyklusphasen eingegangen wird, folgt eine kurze Einführung in die zugrundeliegenden Produktlebenszyklusphasen.

Für die Spezifizierung von Produktlebenszyklusphasen gibt es zwei zentrale Ansätze in der Literatur. Die VDI-Richtlinie 2884¹²³ sowie die DIN-Norm EN 60300-3-3¹²⁴. Während die VDI-Richtlinie den Lebenszyklus eines Produkts in die drei Hauptphasen vor der Nutzung, während

¹²⁰ i.A.a. Boshof (Definition und Auslegung von datenbasierten Dienstleistungen im Werkzeugbau), 2022, S. 65.; Vgl. Begovic (Datenbasiertes Wissensmanagement für Smart Services im Werkzeugbau), 2017, S. 75.

¹²¹ Vgl. Begovic (Datenbasiertes Wissensmanagement für Smart Services im Werkzeugbau), 2017, S. 75; Vgl. Pitsch (Kompetenzfeldbasierte Vernetzung von Werkzeugbaustandorten), 2014, S. 48.

¹²² Vgl. Boos et al. (Smart Tooling), 2016, S. 10.

¹²³ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005.

¹²⁴ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005.

der Nutzung und nach der Nutzung unterteilt¹²⁵, sieht die DIN-Norm 60300-3-3 sechs Hauptphasen im Lebenszyklus eines Produkts vor, diese sind in der nachfolgenden Abbildung 11 dargestellt.¹²⁶



Abbildung 11: Sechs Hauptphasen im Lebenszyklus eines Produkts¹²⁷

Für die spätere Erfassung und Analyse der Lebenszykluskosten ist es von entscheidender Bedeutung, die Zusammenhänge zwischen den Lebenszyklusphasen eines Produkts und den späteren Produktmerkmalen wie beispielsweise Leistung, Sicherheit, Funktionsfähigkeit und Instandhaltbarkeit zu verstehen.¹²⁸

Der Lebenszyklus eines Werkzeugs kann nach SCHUH ET AL. ähnlich strukturiert werden. Dazu werden die vier Phasen Entwicklung, Fertigung & Anlauf, Nutzung und Verwertung differenziert und weiter in 21 Subphasen detailliert. Die erste Phase der Entwicklung beginnt mit der Kundenanfrage und endet mit der Konstruktion. Die zweite Phase Fertigung & Anlauf beginnt mit der Feinplanung und endet mit der Inbetriebnahme. Die dritte Phase der Nutzung startet mit der Serienfertigung und endet mit der kontinuierlichen Verbesserung (KVP). Die letzte Phase der Verwertung startet mit der Einlagerung und wird mit der Verschrottung abgeschlossen. In der nachfolgenden Abbildung 12 sind die Phasen und Subphasen des Werkzeuglebenszyklus nach SCHUH ET AL. abgebildet.¹²⁹

¹²⁵ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 5.

¹²⁶ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 7.

¹²⁷ Eigene Darstellung

¹²⁸ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 8.

¹²⁹ Vgl. Schuh et al. („Kostengünstigere“ Werkzeuge durch Lebenszykluskostenbetrachtung), 2013, S. 973.

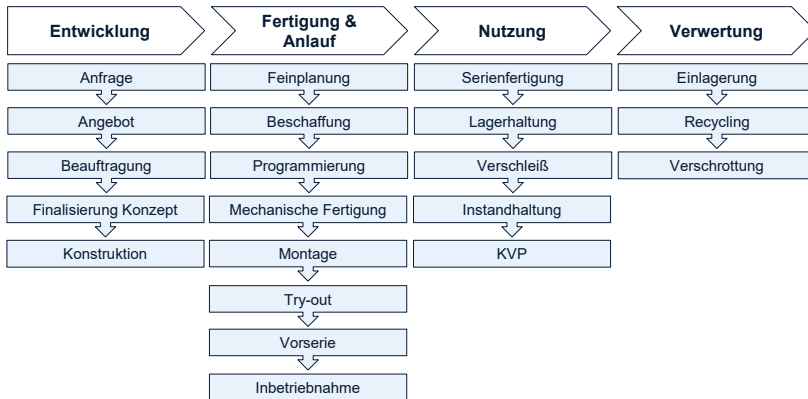


Abbildung 12: Übersicht der Werkzeuglebenszyklusphasen¹³⁰

2.1.7 Werkzeuglebenszykluskosten

Die Kosten, die entlang des Produkt- oder Werkzeuglebenszyklus anfallen, werden Lebenszykluskosten oder Life Cycle Costs (LCC) genannt. Unter diesem Begriff werden alle Kosten, die ein Produkt oder ein Werkzeug über den gesamten Lebenszyklus aus Betreibersicht verursacht hat, zusammengefasst. Gemäß VDI-Richtlinie 2884¹³¹ ist das Life Cycle Costing eine Methode zur Optimierung aller Erlöse und Kosten eines Systems sowie der damit verbundenen Prozesse und Aktivitäten, die über den gesamten Lebenszyklus entstehen. In diesem Zusammenhang sind insbesondere die vier Themenbereiche Prognose, Abbildung, Erklärung und Gestaltung von Bedeutung:¹³²

- „Prognose: Die Lebenszykluskosten und -erlöse sowie nicht monetär erfassbare Folgewirkungen von Entscheidungsalternativen sind zu prognostizieren. Hierdurch lassen sich Alternativen vergleichend beurteilen.
- Abbildung: Die zu ermittelnden Faktoren müssen so dargestellt werden, dass sie die Entscheidungsfindung reell unterstützen.
- Erklärung: Die Relationen bei der Entstehung von Kosten und Erlösen sollen nicht nur erkannt, sondern auch erklärt werden, da erst dann eine aktive Wirkung auf Kosten, Zeit und Qualität möglich wird.
- Gestaltung: Schon zu Beginn des Entscheidungsprozesses sollen Möglichkeiten zur optimierten Gestaltung und Beeinflussung von Kosten und Erlösen erkannt und Potenziale zur Kostensenkung genutzt werden.“¹³³

¹³⁰ Vgl. Schuh et al. („Kostengünstigere“ Werkzeuge durch Lebenszykluskostenbetrachtung), 2013, S. 973.

¹³¹ VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005;

¹³² Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 4.; Vgl. Günther; Kriegbaum C. (Life Cycle Costing), 1997, S. 900-912.

¹³³ VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 4.

Es gibt darüber hinaus zahlreiche Leitfäden und Konzepte zur Erfassung und Berechnung von Lebenszykluskosten. Eine umfangreiche Übersicht und Auswahlhilfe mit 54 verschiedenen ausgewerteten Tools/Leitfäden hat das Kompetenzzentrum innovative Beschaffung der Universität der Bundeswehr München erstellt¹³⁴. Diese lassen sich in die zwei Gruppen produktspezifische und allgemeine Leitfäden/Berechnungsmodelle einteilen.¹³⁵ Im Anwendungszusammenhang hervorzuheben sind die drei Lebenszykluskostenleitfäden im industriellen Kontext VDMA 34160¹³⁶, DIN EN 60300-3-3¹³⁷ und VDI Richtlinie 2884¹³⁸. Die anfallenden Lebenszykluskosten können in Übereinstimmung mit allen drei Normen bzw. Leitfäden in Beschaffungs-, Nutzungs- und Entsorgungskosten unterteilt werden.¹³⁹ In der nachfolgenden Abbildung 13 ist der Zusammenhang dargestellt.

$$\text{Lebenszykluskosten} = \text{Kosten}_{\text{Beschaffung}} + \text{Kosten}_{\text{Nutzung}} + \text{Kosten}_{\text{Entsorgung}}$$

Abbildung 13: Zusammensetzung der Lebenszykluskosten¹⁴⁰

Im VDMA-Leitfaden 34160 zur Berechnung von Lebenszykluskosten werden die drei zuvor genannten Phasen mithilfe von drei Schichten weiter detailliert, um die unterschiedlichen Kostenfaktoren verursachungsgerecht erfassen zu können.¹⁴¹ In Abbildung 14 ist die Struktur der Lebenszykluskosten nach VDMA 34160 dargestellt.

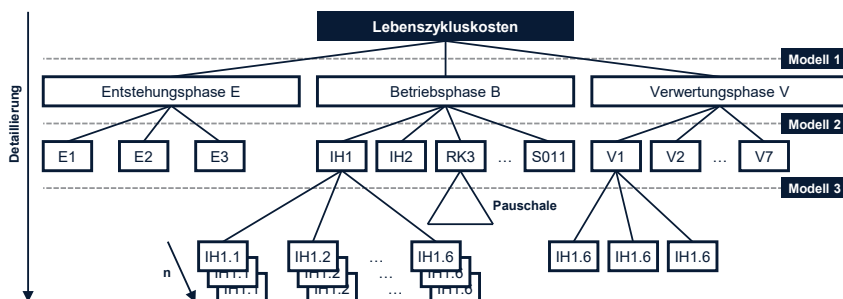


Abbildung 14: Lebenszykluskostenstruktur nach VDMA 34160¹⁴²

Die Lebenszykluskosten können grundsätzlich stark abhängig sein von der Zuverlässigkeit des Produkts. Zuverlässigkeit beschreibt in diesem Zusammenhang die Verfügbarkeit des Produkts sowie die dazugehörigen Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft. Aus höheren Beschaffungskosten kann sich beispielsweise eine

¹³⁴ Vgl. Kompetenzzentrum innovative Beschaffung (Lebenszyklus-Tool-Picker), 2016.

¹³⁵ Vgl. Dreier; Wehking (Lebenszykluskosten von elektrischen Antriebssystemen), 2016, S. 2.

¹³⁶ Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., (VDMA 34160:2006-06), 2006.

¹³⁷ Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005.

¹³⁸ VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005.

¹³⁹ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 8.; Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 5.

¹⁴⁰ Eigene Darstellung

¹⁴¹ Vgl. VDMA (Berechnung von Lebenszykluskosten), 2012, S. 6.

¹⁴² Vgl. VDMA (Berechnung von Lebenszykluskosten), 2012, S. 6.

Verbesserung der Instandhaltbarkeit oder der Funktionsfähigkeit ergeben, was zu einer verbesserten Verfügbarkeit und damit niedrigeren Betriebs- und Instandhaltungskosten führen kann. Falls ein Produkt nicht verfügbar ist, können zudem eine Reihe von Folgekosten entstehen. Dazu zählen beispielsweise Gewährleistungskosten, Haftungskosten, Einnahmeverluste und Kosten für die Bereitstellung von Servicealternativen.¹⁴³

Nachdem zuvor verschiedene allgemeingültige Normen und Leitfäden zur Strukturierung von Lebenszykluskosten beschrieben worden sind, wird nachfolgend das Forschungsprojekt „Entwicklung einer Methode zur Verknüpfung von Angebotskalkulation und Lebenszykluskostenrechnung für Erzeugnisse des Werkzeug- und Formenbaus (LCC)“ des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover kurz vorgestellt, um die Relevanz der Werkzeuglebenszykluskostenanalyse zu unterstützen.

Im Rahmen des genannten Forschungsprojekts wurde eine Methode erarbeitet, anhand dieser die Lebenszykluskosten von Werkzeugen und Formen ermittelt, erfasst und analysiert werden können. Dazu sind durch neun beteiligte Werkzeugbaubetriebe 61 unterschiedliche blechverarbeitende Werkzeuge und damit unterschiedliche Produkte hergestellt worden.¹⁴⁴ Die Lebenszykluskosten der Werkzeuge wurden dabei detailliert manuell erfasst. Durchschnittlich setzten sich die Lebenszykluskosten eines blechverarbeitenden Werkzeugs auf Basis der Forschungsergebnisse zu 45 % aus den Entstehungs- und zu 55 % aus den Betriebskosten zusammen. Zu den Betriebskosten zählen sowohl die Stillstandskosten mit einem Anteil von 10 % als auch die Wartungskosten mit einem Anteil von 45 %.¹⁴⁵ In der nachfolgenden Abbildung 15 sind die aggregierten Ergebnisse dargestellt. Für weitere Ergebnisse des Forschungsvorhabens wird auf den durch die Forschungsgemeinschaft Qualität e.V. FQS veröffentlichten Leitfaden FQS-DGQ Band 84 - 06 verwiesen.¹⁴⁶

¹⁴³ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 9-10.

¹⁴⁴ Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 6.; Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 16-17.

¹⁴⁵ Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 16-17.

¹⁴⁶ Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006.

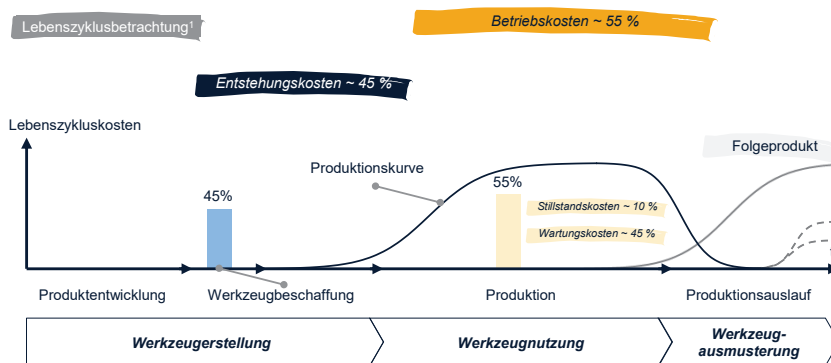


Abbildung 15: Werkzeuglebenszykluskostenverteilung¹⁴⁷

Abschließend werden verschiedene Herausforderungen der Lebenszykluskostenbetrachtung im Allgemeinen und konkret für die Branche Werkzeugbau vorgestellt. Trotz der vielen Vorteile, die eine Lebenszykluskostenbetrachtung bietet, ist deren Anwendung in der Praxis noch nicht weit verbreitet.¹⁴⁸ Ein Grund dafür liegt laut MÜLLER ET AL. in der fehlenden Anleitung zur Ermittlung der für die Lebenszykluskostenberechnung benötigten Daten.¹⁴⁹ Auch SCHWEIGER sieht in falschen Kalkulationsgrundlagen ein Problem. Investitionsentscheidungen sind zudem häufig durch den Einkauf getrieben, der vermehrt auf den Anschaffungspreis fokussiert ist und lediglich geringfügig durch die Instandhaltung beraten wird. Ein weiteres Problem besteht in der fehlenden Datentransparenz. Der Kunde will dem Hersteller häufig seine Betriebsdaten nicht zur Verfügung stellen, weshalb Folgekosten aufgrund der tatsächlichen Belastung eines Produkts im Einsatz und den resultierenden Ausfällen für den Hersteller nur schwer abzuschätzen sind.¹⁵⁰ Für eine gezielte Steigerung der Wirtschaftlichkeit eines Werkzeugbaubetriebs, im Anwendungskontext bedeutet dies die Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten bei einer gleichzeitigen Steigerung der Verfügbarkeit und Ausbringungsmenge eines Werkzeugs, sind die detaillierte Erfassung und Auswertung von Zustands- und Prozessinformationen über den gesamten Werkzeuglebenszyklus notwendig.¹⁵¹ Unternehmen der Branche Werkzeugbau sehen sich aktuell mit drei Herausforderungen im Kontext der Werkzeuglebenszykluskostenanalyse konfrontiert. Die erste Herausforderung stellt die systematische und anforderungsgerechte Erfassung der Werkzeuglebenszykluskosten und -daten über den gesamten Werkzeuglebenszyklus dar. Für eine ganzheitliche Analyse und Auswertung ist es notwendig, alle relevanten Lebenszyklusdaten und -faktoren zu erheben und an einem zentralen Ort zu verwalten. Die zweite Herausforderung ist der Detaillierungsgrad und die Qualität der Daten. Für eine aussagekräftige Werkzeuglebenszykluskostenanalyse und -prognose sind die Anforderungen

¹⁴⁷ J.A.a. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 16-17.

¹⁴⁸ Vgl. Mattes; Schröter (Wirtschaftlichkeitsbewertung), 2012, S. 18.

¹⁴⁹ Vgl. Müller et al. (Lebenszykluskosten in der Digitalen Fabrik), 2016, S. 251.

¹⁵⁰ Vgl. Schweiger (Nachhaltige Wettbewerbsvorteile für Anbieter und Nutzer von Maschinen/Anlagen), 2009, S. 21-22.

¹⁵¹ Vgl. Schuh et al. (Effizienzsteigerung der Serienproduktion durch vorausschauende Werkzeugwartung), 2019, S. 880.

an den Umfang, die Qualität sowie den Detaillierungsgrad der Daten sehr hoch. Eine Ausfallanalyse kann bspw. nur bei Vorliegen konsistenter und vollständiger Daten erfolgen. Die dritte Herausforderung ist die Vergleichbarkeit von Werkzeugen und Formen. Die Prognose der Werkzeuglebenszykluskosten ist nur dann verlässlich, wenn die Werkzeuge und die damit durchgeführte Fertigung vergleichbar ist.¹⁵²

2.2 Industrie 4.0

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen des Begriffs Industrie 4.0 in produzierenden Unternehmen erläutert. Zunächst werden die relevanten Begrifflichkeiten definiert und voneinander abgegrenzt. Im Anschluss werden technologische Befähiger von Industrie 4.0 beschrieben sowie ein Ausblick auf die Smart Factory und die damit verbundenen Nutzenpotenziale gegeben.

2.2.1 Begriffsdefinition und -abgrenzung

Für ein besseres Verständnis werden zunächst die Begriffe Industrie 4.0, Digitalisierung sowie digitale Vernetzung definiert und anschließend voneinander abgegrenzt. Das Themenfeld Data Science, das im Rahmen von Industrie 4.0 zunehmend an Bedeutung gewinnt, wird separat im Unterkapitel 2.3 betrachtet.

2.2.1.1 Begriffsdefinition Industrie 4.0

Der Begriff Industrie 4.0 ist erstmalig im Jahr 2011 auf der Hannover Messe von KAGERMANN ET AL. der Öffentlichkeit vorgestellt worden. Zuvor hat die Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft der Bundesregierung im Januar 2011 in ihren Handlungsempfehlungen das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 zur Sicherung des deutschen Produktionsstandorts vorgeschlagen.¹⁵³ Im Jahr 2013 wurde auf der Hannover Messe der Abschlussbericht des Arbeitskreises mit Vertretern aus Wissenschaft und Industrie mit dem Titel „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“ vorgestellt.¹⁵⁴ Im Rahmen dieses Abschlussberichts wird mit Industrie 4.0 zunächst die digitale Vernetzung von Ressourcen, Informationen, Objekten und Menschen mittels Informations- und Kommunikationstechnik bezeichnet, wobei 4.0 für die vierte industrielle Revolution steht.¹⁵⁵ Diese folgt auf drei in den letzten 260 Jahren vorangegangene industrielle Revolutionen, die nachfolgend kurz vorgestellt werden¹⁵⁶:

1. Industrielle Revolution – 1784: Einführung von mechanischen Produktionsanlagen mit Hilfe von Wasser- und Dampfkraft
2. Industrielle Revolution – 1870: Einführung der arbeitsteiligen Massenproduktion mit Hilfe elektrischer Energie

¹⁵² Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 23.

¹⁵³ Vgl. Kagermann et al. (Industrie 4.0), 2011.

¹⁵⁴ Vgl. Kagermann et al. (Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0.), 2013.

¹⁵⁵ Vgl. Kagermann et al. (Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0.), 2013, S. 17.

¹⁵⁶ Vgl. Bauernhansl (Die Vierte Industrielle Revolution), 2017, S. 2.; Vgl. Kagermann et al. (Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0.), 2013, S. 17.

3. Industrielle Revolution – 1969: Einsatz von Elektronik und Informationstechnologie zur weiteren Automatisierung der Produktion

Um die mit dem Zukunftsprojekt Industrie 4.0 verbunden Potenziale ganzheitlich und zielgerichtet nutzbar zu machen, wurde auf Bestreben zahlreicher Unternehmen der deutschen Industrie den Branchenverbänden BITKOM, VDMA und ZVEI eine Führungsrolle ausgesprochen. Die entstandene gemeinsame Plattform Industrie 4.0 wird heute von einer verbandsübergreifenden Geschäftsstelle getragen. Die Zielsetzung ist die Etablierung Deutschlands sowohl als Leitanbieter entsprechender Maschinen und Einrichtungen sowie als Leitanwender. Die inhaltliche Ausgestaltung findet in Arbeitskreisen statt, die von einem wissenschaftlichen Beirat unterstützt werden.¹⁵⁷ Im Laufe der evolutionären Weiterentwicklung der vierten industriellen Revolution wurde der Betrachtungsbereich und die genaue Definition verändert.¹⁵⁸ So lautete die offizielle Definition unter Leitung der drei Industrieverbände Bitkom, VDMA und ZVEI im Jahre 2015 wie folgt¹⁵⁹:

*„Der Begriff Industrie 4.0 steht für die vierte industrielle Revolution, einer neuen Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten. [...] Basis ist die Verfügbarkeit aller relevanten Informationen in Echtzeit durch Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen sowie die Fähigkeit aus den Daten den zu jedem Zeitpunkt optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten. Durch die Verbindung von Menschen, Objekten und Systemen entstehen dynamische, echtzeitoptimierte und selbst organisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke, die sich nach unterschiedlichen Kriterien wie beispielsweise Kosten, Verfügbarkeit und Ressourcenverbrauch optimieren lassen.“*¹⁶⁰

Im Jahr 2021 wurde der Begriff Industrie 4.0 durch den Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 weiterentwickelt und um den Aspekt der datenbasierten Geschäftsmodelle ergänzt:

*„Der Begriff „Industrie 4.0“ steht für Digitalisierung und intelligente Vernetzung in der industriellen Wertschöpfung. Darauf aufbauend lassen sich innovative, individualisierte Produkte und nachgelagerte Dienstleistungen realisieren, indem datengetriebene und plattformbasierte Geschäftsmodelle mit neuen Formen der Erlösgenerierung implementiert werden.“*¹⁶¹

Für die vorliegende Arbeit sollen die beiden angeführten Definitionen des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0 führend sein. Auf vergleichbare Initiativen beispielsweise in den USA, in China und Japan wird nicht näher eingegangen, da alle diese Initiativen ähnliche Ziele haben und auf vergleichbaren Technologien aufbauen.¹⁶²

¹⁵⁷ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hintergrund zur Plattform Industrie 4.0).

¹⁵⁸ Vgl. Gölzer (Big Data in Industrie 4.0), 2017a, S. 27.

¹⁵⁹ Vgl. Sendler (Industrie 4.0 grenzenlos), 2016, S. 17.

¹⁶⁰ BITKOM et al. (Umsetzungsstrategie Industrie 4.0), 2015, S. 8.

¹⁶¹ Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0; acatech (Industrie 4.0 – Forschung für die Gestaltung der Zukunft), 2021, S. 3.

¹⁶² Vgl. Schuh et al. (Industrie 4.0 Maturity Index), 2020, S. 11.; Vgl. Gölzer (Big Data in Industrie 4.0), 2017a, S. 30.

Die Implementierung von Industrie 4.0 lässt sich laut SCHUH ET AL. gemessen am Reifegrad der Umsetzung in Reifegradstufen unterteilen. Die sechs aufeinander aufbauenden Reifegradstufen sind in der nachfolgenden Abbildung 16 dargestellt. Diese basieren auf zwei Stufen der Digitalisierung im Rahmen der dritten industriellen Revolution. Die Stufen der Computerisierung und Konnektivität schaffen die informationstechnischen Voraussetzung für die Implementierung und Anwendung von Industrie 4.0 in Unternehmen. Das Ziel der ersten Reifegradstufe ist die Sichtbarkeit aller relevanten Daten entlang des Auftragsabwicklungsprozesses durch die Erzeugung eines Digitalen Schattens.¹⁶³ Der Digitale Schatten ist das „hinreichend genaue Abbild der Prozesse in der Produktion, der Entwicklung und angrenzenden Bereichen mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten zu schaffen.“¹⁶⁴ Das Ziel der zweiten Stufe besteht darin, Transparenz über bestehende Wirkzusammenhänge zu schaffen. Dazu ist die Verknüpfung, Aggregation und kontextuelle Einordnung von Daten notwendig. Die dritte Stufe hat die Zielsetzung, auf Basis vergangenheitsbezogener Daten Vorhersagen über Zukunftsszenarien und deren Eintrittswahrscheinlichkeit zu ermöglichen. Die vierte und höchste Reifegradstufe Adaptierbarkeit hat das Ziel, selbstoptimierende Prozesse und Systeme zu ermöglichen.¹⁶⁵

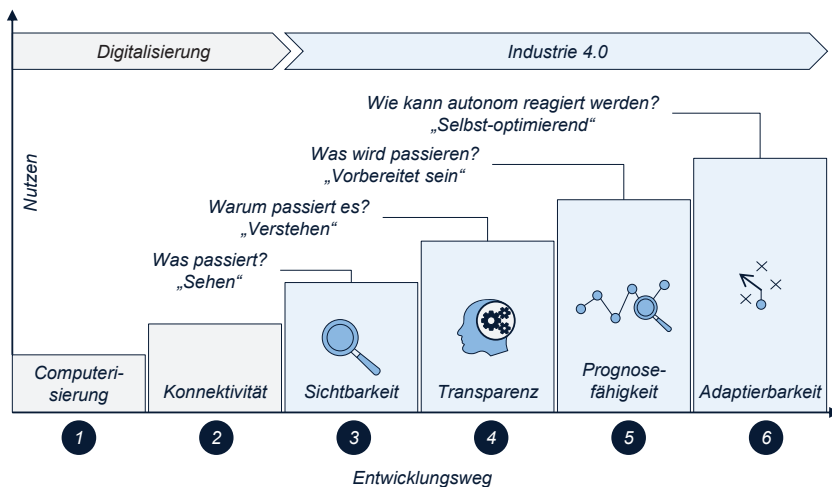


Abbildung 16: Stufen des Industrie 4.0 Entwicklungspfad¹⁶⁶

Im Jahr 2019 ist das Leitbild 2030 für Industrie 4.0 durch die Akteure der Plattform Industrie 4.0 als Wirtschaften und Arbeiten in globalen, digitalen Ökosystemen definiert worden. Flexible, hochdynamische und weltweit vernetzte Wertschöpfungsnetzwerke mit neuen Arten der Kooperation lösen starre und fest definierte Wertschöpfungsketten ab. Kundennutzen und LÖ-

¹⁶³ Vgl. Schuh et al. (Industrie 4.0 Maturity Index), 2017, S. 19-20.

¹⁶⁴ Schuh et al. (WGP-Standpunkt Industrie 4.0), 2016, S. 23.

¹⁶⁵ Vgl. Schuh et al. (Industrie 4.0 Maturity Index), 2017, S. 17-21.

¹⁶⁶ i.A.a. Schuh et al. (Industrie 4.0 Maturity Index), 2017, S. 16.

sungsorientierung werden durch datengetriebene Geschäftsmodelle in den Vordergrund gestellt und ersetzen die Produktzentrierung als vorherrschendes Paradigma der industriellen Wertschöpfung. Zentrale Erfolgsfaktoren in der vernetzten Ökonomie sind Verfügbarkeit, Transparenz und Zugang zu Daten.¹⁶⁷ Zentral für eine erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0 in diesem Sinne sind drei strategische Handlungsfelder und deren Verknüpfung miteinander.¹⁶⁸

- Souveränität – Die Freiheit aller Akteure am Markt, selbstbestimmte, unabhängige Entscheidungen zu treffen und im fairen Wettbewerb miteinander zu agieren
- Interoperabilität – Die flexible Vernetzung unterschiedlicher Akteure zu agilen Wertschöpfungsnetzwerken
- Nachhaltigkeit – Ökonomische, ökologische und soziale Nachhaltigkeit als fundamentaler Eckpfeiler der gesellschaftlichen Werteorientierung

Für die kommende Dekade der anstehenden Skalierung von Industrie 4.0 werden von den Akteuren der Plattform Industrie 4.0 die genannten Handlungsfelder als leitend angesehen.¹⁶⁹ In der nachfolgenden Abbildung 17 sind die drei strategischen Handlungsfelder dargestellt.

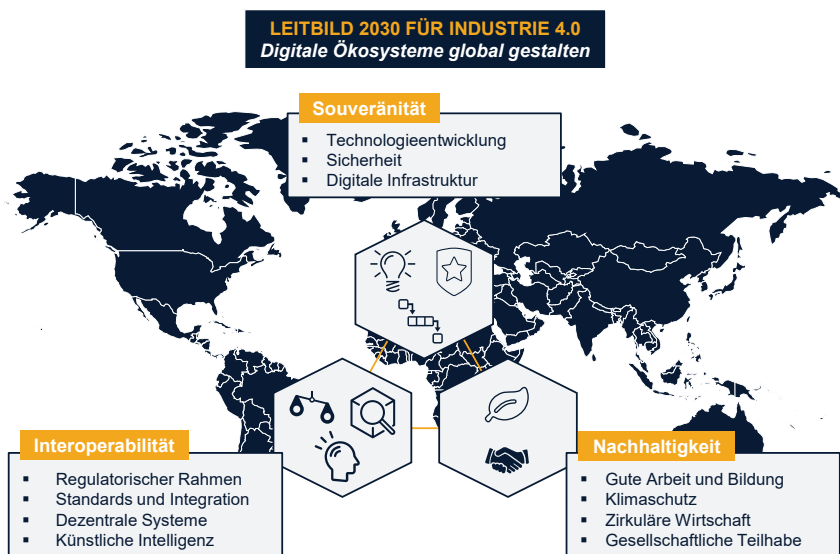


Abbildung 17: Leitbild 2030 für Industrie 4.0¹⁷⁰

Die Erläuterungen zur Definition und Beschreibung des Begriffs Industrie 4.0 führen zu zwei Erkenntnissen. Zum einen ist die digitale Vernetzung zentraler Bestandteil von Industrie 4.0

¹⁶⁷ Vgl. BMWi (Leitbild 2030 für Industrie 4.0), 2019, S. 3.

¹⁶⁸ Vgl. BMWi (Leitbild 2030 für Industrie 4.0), 2019, S. 3-6.

¹⁶⁹ Vgl. BMWi (Leitbild 2030 für Industrie 4.0), 2019, S. 3.

¹⁷⁰ i.A.a. BMWi (Leitbild 2030 für Industrie 4.0), 2019, S. 3.

und zum anderen stellt die Digitalisierung eine notwendige Voraussetzung zur Umsetzung von Industrie 4.0 dar. Im Folgenden werden daher die beiden Begriffe Digitalisierung und digitale Vernetzung kurz erläutert.

2.2.1.2 Begriffsdefinition Digitalisierung

Für den Begriff Digitalisierung existieren unterschiedliche Bedeutungen. Zum einen wird darunter die *„digitale Umwandlung und Darstellung bzw. Durchführung von Information und Kommunikation oder die digitale Modifikation von Instrumenten, Geräten und Fahrzeugen“* verstanden.¹⁷¹ Eine andere Bedeutung ist die *„digitale Revolution, die auch als dritte Revolution bekannt ist, bzw. die digitale Wende. Im letzteren Kontext werden nicht zuletzt "Informationszeitalter" und "Computerisierung" genannt.“*¹⁷² Im Kontext dieser Arbeit wird der Begriff Digitalisierung mit der zuerst genannten Bedeutung verwendet. Der Begriff der Digitalisierung ist eng mit dem Begriff digitale Vernetzung verwandt, der im Folgenden definiert und abgegrenzt wird.

2.2.1.3 Begriffsdefinition digitale Vernetzung

Die intelligente digitale Vernetzung der Wertschöpfung ist eine notwendige Voraussetzung zur Umsetzung von Industrie 4.0.¹⁷³ Dabei wird zwischen der vertikalen Vernetzung von Produkten und Systemen sowie der horizontalen Vernetzung über Wertschöpfungsnetzwerke hinweg unterschieden.¹⁷⁴ In der Produktions- und Automatisierungstechnik sowie in der Informationstechnologie wird unter dem Begriff der vertikalen Vernetzung die Integration der verschiedenen Informationssysteme entlang der unterschiedlichen Hierarchieebenen zu einer durchgängigen Lösung verstanden. Zu möglichen Hierarchieebenen in der produzierenden Industrie zählen beispielsweise die Aktor- und Sensorebene, die Steuerungsebene, die Produktionsleitebene und die Unternehmensplanungsebene.¹⁷⁵ Für weitergehende Ausführungen zu den einzelnen Hierarchieebenen wird auf DIN EN 62264 verwiesen. Mit Industrie 4.0 soll die starre Struktur der Automatisierungspyramide durch flexible, dezentral organisierte Unternehmenssteuerungsnetzwerke abgelöst werden. Das zu fertigende Produkt selbst steuert die Produktion.¹⁷⁶ Der Begriff der horizontalen Vernetzung wird in der Produktions- und Automatisierungstechnik sowie in der Informationstechnologie als die digitale Vernetzung der verschiedenen IT-Systeme entlang des Auftragsabwicklungsprozesses zu einer digital durchgängigen Lösung verstanden. Die horizontale Vernetzung kann sowohl innerhalb eines Unternehmens als auch über Unternehmensgrenzen hinweg realisiert werden.¹⁷⁷ Das Ziel ist die sichere Überwindung

¹⁷¹ Gabler Wirtschaftslexikon (Stichwort: Digitalisierung), 2021.

¹⁷² Gabler Wirtschaftslexikon (Stichwort: Digitalisierung), 2021.

¹⁷³ Vgl. Forschungsbeitrag der Plattform Industrie 4.0; acatech (Industrie 4.0 – Forschung für die Gestaltung der Zukunft), 2021, S. 3.

¹⁷⁴ Vgl. Kagermann et al. (Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0.), 2013, S. 23.

¹⁷⁵ Vgl. Kagermann et al. (Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0.), 2013, S. 24.

¹⁷⁶ Vgl. Kleinemeier (Von der Automatisierungspyramide zu Unternehmenssteuerungs-Netzwerken), 2017, S. 219.; Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft (Cyber-Physical Systems), 2013, S. 4.

¹⁷⁷ Vgl. Kagermann et al. (Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0.), 2013, S. 24.

von Schnittstellen zwischen Wertschöpfungspartnern, um Produktivitäts- und Flexibilitätsvorteile einzelner Unternehmen auf Wertschöpfungsnetzwerke zu übertragen.¹⁷⁸

2.2.2 Technologische Befähiger von Industrie 4.0

Im folgenden Unterkapitel werden die wichtigsten Befähiger für Industrie 4.0 aus der Sicht der Produktionstechnik vorgestellt. Dazu zählen Cyber-physische Systeme (CPS), das Internet der Dinge und Dienste, der Digitale Schatten und der Digitale Zwilling sowie das Cloud- und Edge Computing.

2.2.2.1 Cyber-physische Systeme

Die technische Basis der vierten industriellen Revolution sind Cyber-physische Systeme (CPS).¹⁷⁹ Sie stehen stellvertretend für die Durchdringung unseres täglichen Lebens mit Informationstechnologie, indem sie eine Verbindung zwischen der physischen und der digitalen Welt herstellen.¹⁸⁰ Cyber-physische Systeme werden in der integrierten Forschungsagenda Cyber-Physical Systems wie folgt definiert:¹⁸¹

„CPS umfassen eingebettete Systeme, Logistik-, Koordinations- und Managementprozesse sowie Internetdienste, die mittels Sensoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken, mittels digitaler Netze untereinander verbunden sind, weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen und über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen. Cyber-Physical Systems sind offene soziotechnische Systeme und ermöglichen eine Reihe von neuartigen Funktionen, Diensten und Eigenschaften, die über die heutigen Fähigkeiten eingebetteter Systeme mit kontrolliertem Verhalten weit hinausgehen.“¹⁸²

Die Möglichkeit der vernetzten Datengewinnung und die interaktive Begleitung von Kunden- und Nutzerprozessen ergeben große Potenziale für Innovationen und neue Geschäftsmodelle für nahezu jede Branche. Im Maschinen- und Anlagenbau werden durch die sensorgestützte Vernetzung von intelligenten Maschinen und Produkten untereinander und mit übergreifenden Produktionsplanungs-, Energiemanagement und Lagersystemen auch über Unternehmensgrenzen hinweg Qualitäts-, Optimierungs- und Effizienzsteigerungen ermöglicht.¹⁸³

2.2.2.2 Internet der Dinge und Dienste

Eine weitere wichtige Grundlage für Industrie 4.0 ist das Internet der Dinge, das im Englischen „Internet of Things“ genannt wird. Es ist die Verknüpfung von physischen Objekten aus der

¹⁷⁸ Vgl. Schatz; Bauernhansl (Geschäftsmodell-Innovationen), 2017, S. 247.; i.A.a. Lucke et al. (Strukturstudie „Industrie 4.0 für Baden-Württemberg“), 2014, S. 7-9.

¹⁷⁹ Vgl. Kagermann et al. (Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0.), 2013, S. 5.

¹⁸⁰ Vgl. Lucke et al. (Strukturstudie „Industrie 4.0 für Baden-Württemberg“), 2014, S. 10.; Vgl. Geisberger; Broy (agendaCPS), 2012, S. 17.

¹⁸¹ Geisberger; Broy (agendaCPS), 2012, S. 244.

¹⁸² Geisberger; Broy (agendaCPS), 2012, S. 244.

¹⁸³ Vgl. Schuh et al. (Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme), 2017, S. 75-80.; Vgl. Schuh et al. (WGP-Standpunkt Industrie 4.0), 2016, S. 12.; Vgl. Monostori et al. (Cyber-physical systems in manufacturing), 2016, S. 638.; Vgl. Geisberger; Broy (agendaCPS), 2012, S. 23.

realen Welt mit ihren virtuellen Repräsentanten in der digitalen Welt. Es baut auf dem Internet der Daten, das im Wesentlichen die Funktionen des Datenaustauschs und der Kommunikation per E-Mail sowie der Informationssuche im World Wide Web beinhaltet, auf. Der Begriff IoT wurde 1999 durch Kevin Ashton vom Auto-ID Center am Massachusetts Institute of Technology geprägt.¹⁸⁴ Im Jahr 2007 wurde während der deutschen EU-Ratspräsidentschaft die technische Vision des Internets der Dinge wie folgt definiert:¹⁸⁵

„Das Internet der Dinge ist die technische Vision, Objekte jeder Art in ein universales digitales Netz zu integrieren. Ausgestattet mit einer eindeutigen Identität, befinden bzw. bewegen sie sich in einem „intelligenten“ Umfeld, wodurch eine Verbindung zwischen der physischen Welt der Dinge und der virtuellen Welt der Daten geschaffen wird.“¹⁸⁶

Mithilfe einer eindeutigen Internetprotokoll(IP)-Adresse können die physischen Objekte zu jederzeit im Internet der Dinge identifiziert werden. Ohne menschlichen Eingriff können sie untereinander Informationen austauschen, z. B. zählen dazu ihr Standort oder ihr Betriebszustand. Der Einsatz des Internet of Things in der Produktion wird auch als Industrial Internet of Things (IIoT) bezeichnet.¹⁸⁷ Im Produktionsumfeld können durch die Vernetzung von vorhandenen Maschinen, Fahrzeugen, Werkzeugen, Materialien und Werkstücken Prozesse intelligenter und effizienter gestaltet werden.¹⁸⁸

Das Internet der Dienste, im Englischen Internet of Services (IoS) genannt, ergänzt das IoT. Es ermöglicht das Angebot und die Nutzung digitaler, internetbasierter Dienstleistungen durch die Integration unterschiedlicher Softwarebausteine zu komplexen und gleichzeitig flexiblen Lösungen. Die individuell zusammengestellten digitalen Dienstleistungen dienen der Bewältigung komplexer Problemstellungen.¹⁸⁹ Die gleichzeitige Verknüpfung von intelligenten Objekten und internetbasierten Services wird auch als Internet of Things and Services (IoTS) bezeichnet und ist erforderlich für die Umsetzung vieler Industrie 4.0 Anwendungen.¹⁹⁰

2.2.2.3 Digitaler Schatten & Digitaler Zwilling

Weitere technologische Befähiger von Industrie 4.0 sind der Digitale Schatten und der Digitale Zwilling. Für die beiden Begriffe finden sich in der Literatur vielfältige Definitionen. Für die vorliegende Arbeit sind die Definitionen nach SCHUH ET AL. maßgebend.¹⁹¹

„Der Digitale Schatten [...] ist das hinreichend genaue Abbild der Prozesse in der Produktion, der Entwicklung und angrenzenden Bereichen mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten zu schaffen. Im Einzelnen gehört dazu

¹⁸⁴ Vgl. Steven (Industrie 4.0), 2019, S. 77.; Vgl. Ashton (That 'Internet of Things' Thing), 2009.

¹⁸⁵ Deutscher Bundestag (Internet der Dinge - Aktueller Begriff), 2012.

¹⁸⁶ Deutscher Bundestag (Internet der Dinge - Aktueller Begriff), 2012.

¹⁸⁷ Vgl. Steven (Industrie 4.0), 2019, S. 78; Vgl. Bauernhansl (Die Vierte Industrielle Revolution), 2017, S. 5-20.

¹⁸⁸ Vgl. Pistorius (Industrie 4.0 - Schlüsseltechnologien Für Die Produktion), 2020, S. 9.; Vgl. Deloitte (Industrielles Internet der Dinge und die Rolle von Telekommunikationsunternehmen), 2016, S. 3-6.

¹⁸⁹ Vgl. Schuh et al. (WGP-Standpunkt Industrie 4.0), 2016, S. 32.; Vgl. Fensel (Internet of Services: Herausforderung und Potenzial), 2011, S. 59-63.

¹⁹⁰ Vgl. Steven (Industrie 4.0), 2019, S. 78.

¹⁹¹ Schuh et al. (WGP-Standpunkt Industrie 4.0), 2016, S. 23.

*die Beschreibung der notwendigen Datenformate, der Datenauswahl und der Datengranularitätsstufe.*¹⁹²

Der Digitale Schatten besteht aus Datenspuren, die für einen bestimmten Verwendungszweck oder Analysefokus erzeugt und ausgewertet werden. Neben den reinen Datensätzen beinhalten die Datenspuren kontextbehaftete Metadaten wie zum Beispiel Bezugsquelle, Erfassungszeitpunkt und Auflösung. Diese Metadaten werden zur semantischen Verarbeitung benötigt.¹⁹³ Für Digitale Schatten der Produktion ergeben sich hinsichtlich der Modellierung fünf Konsequenzen, die nachfolgend kurz erläutert werden:¹⁹⁴

- *K1: Digitale Schatten müssen domänenspezifisches Wissen beinhalten*
- *K2: Digitale Schatten sind stets kontextbezogen*
- *K3: Digitale Schatten ermöglichen domänenübergreifende Analysen*
- *K4: Digitale Schatten benötigen angepasste IT Infrastrukturen im Fabrikbetrieb*
- *K5: Digitale Schatten nehmen keinen Einfluss auf das reale Systemverhalten*

Besonders im Bereich der Produktion, die sich steigenden Qualitätsanforderungen, sowie einem hohen Kostendruck gegenübersteht, bringt die Erfassung und Analyse von Prozessdaten einen großen Mehrwert. Die Nutzung des Digitalen Schattens macht den Produktionsprozess transparenter und ermöglicht die Identifizierung von Ursachen für Abweichungen. Der Digitale Schatten bildet dabei die Basis für Methoden und Modelle der Datenauswertung und -analyse.¹⁹⁵

Der Begriff des Digitalen Zwillings existiert neben dem Begriff des Digitalen Schattens. Im ersten Schritt überführt zunächst der Digitale Schatten den realen Produktionsprozess in die virtuelle Welt. Im zweiten Schritt kann der Digitale Zwilling darauf aufbauend durch ein Prozessmodell und durch Simulation ein möglichst identisches Abbild der Realität liefern.¹⁹⁶ Das ursprüngliche Konzept des Digitalen Zwillings kann auf ein NASA Raumfahrtprogramm zurückgeführt werden. Zwei identische Raumschiffe wurden gebaut, um den Zustand des Raumschiffs im Weltall zu spiegeln. Das Raumschiff auf der Erde wurde Zwilling genannt.¹⁹⁷ Der damalige Zweck des Zwillings ist im heutigen technischen Umfeld identisch, lediglich die Umsetzung hat sich verändert. Digitale Zwillinge sind realistische Datenmodelle, die physische Produkte mit all ihren Komponenten, ihrem aktuellen Zustand sowie ihrer Interaktion mit ihrer Umgebung abbilden.

¹⁹² Schuh et al. (WGP-Standpunkt Industrie 4.0), 2016, S. 23.

¹⁹³ Vgl. Schuh et al. (Effizientere Produktion mit Digitalen Schatten), 2020, S. 106.

¹⁹⁴ Schuh et al. (Effizientere Produktion mit Digitalen Schatten), 2020, S. 106.

¹⁹⁵ Vgl. Schuh et al. (WGP-Standpunkt Industrie 4.0), 2016, S. 24-25.

¹⁹⁶ Vgl. Schuh et al. (WGP-Standpunkt Industrie 4.0), 2016, S. 23.

¹⁹⁷ Vgl. Rosen et al. (About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing), 2015, S. 568.

Der Digitale Zwilling ermöglicht das Produkt über die gesamte Lebensdauer von der Konzeptions- bis hin zur Realisierungsphase zu definieren, zu simulieren, vorherzusagen und zu verifizieren.¹⁹⁸ Darüber hinaus werden zusätzliche intelligente Dienste wie zum Beispiel Zertifizierung, Wartung, Überwachung, Aktualisierung und Nutzungsprognosen ermöglicht.¹⁹⁹ Da für einen vollständigen und umfassend funktionalen Digitalen Zwilling eine Vielzahl heterogener Daten unter ständiger Konsistenzprüfung verarbeitet werden müssten, ist eine Umsetzung in der Produktion zum jetzigen Zeitpunkt kaum realisierbar.²⁰⁰ Zunächst wird daher insbesondere in der Produktion das Konzept des Digitalen Schattens präferiert, indem lediglich die zu einer spezifischen Aufgabe oder Fragestellung notwendigen Daten erfasst, verarbeitet und analysiert werden.²⁰¹

2.2.2.4 Cloud- und Edge-Computing

Cloud- und Edge-Computing sind zwei weitere Basistechnologien für Industrie 4.0. Beim Cloud-Computing steht die flexible und bedarfsgerechte Bereitstellung von IT-Ressourcen über das Internet im Vordergrund. Der Vorteil für Unternehmen besteht in der Nutzung von individuell zugeschnittenen Cloud-Lösungen ohne Installation der Software auf dem lokalen Rechner.²⁰² Ein weiterer Vorteil im Kontext von Industrie 4.0 ist die Vernetzung von verteilten Komponenten wie beispielsweise die Anbindung von Produktionsanlagen über standardisierte Schnittstellen. Physikalisch getrennt erhobene Daten können in der Cloud zentral gespeichert und über einen einzigen Zugang abgerufen und verknüpft werden. Sie stehen mit einer hohen Verfügbarkeit sowohl orts- als auch geräteunabhängig zur Verfügung.²⁰³ Als größte Herausforderung bei der Nutzung von Cloud-Lösungen gilt die absolute Sicherheit der Daten sowie die Verfügbarkeit und die Performance der Dienste.²⁰⁴

In der Regel werden beim Cloud-Service drei Modelle unterschieden, die nachfolgend beschrieben werden:²⁰⁵

- Infrastructure as a Service (IaaS): Anstatt IT-Hardware zu beschaffen, beziehen Unternehmen Server, Speicher und Netzwerkinfrastruktur von Cloudanbietern
- Platform as a Service (PaaS): Unternehmen können benutzerdefinierte Anwendungen auf einer eigens für Sie bereitgestellten Plattform entwickeln und ausführen. Es entfällt der Aufwand für die Pflege der Plattform. Der Zugriff findet über eine sichere Schnittstelle statt.

¹⁹⁸ Vgl. Grieves; Vickers (Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems), 2017, S. 92-98.

¹⁹⁹ Vgl. Glaessgen; Stargel (The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles), S. 1-2.

²⁰⁰ Vgl. Talkhestani et al. (Synchronisierung von digitalen Modellen), 2017, S. 62-69.

²⁰¹ Vgl. Schuh et al. (Effizientere Produktion mit Digitalen Schatten), 2020, S. 107.

²⁰² Vgl. Mell; Grance (The NIST Definition of Cloud Computing), 2011, S. 2.

²⁰³ Vgl. Fallenbeck; Eckert (IT-Sicherheit und Cloud Computing), 2017, S. 135-141.

²⁰⁴ Vgl. Pistorius (Industrie 4.0 - Schlüsseltechnologien Für Die Produktion), 2020, S. 15-18.; Vgl. Bundesverband der Deutschen Industrie e. V.: (Cloud Computing Wertschöpfung in der digitalen Transformation), 2013, S. 8-13.

²⁰⁵ Vgl. Dzombeta et al. (Datensicherheit bei Smart Devices und Cloud-Sicherheit und Datenschutz im Cloud Computing), 2017, S. 282.

- Software as a Service (SaaS): Im Gegensatz zum klassischen Erwerb von dauerhaften Softwarelizenzen nutzt das Unternehmen gezielt Software-Dienste eines Cloudanbieters über das Internet. Administration und Wartung werden durch den Dienstleister übernommen.

Die Edge-Computing Technologie ermöglicht die in vielen Fällen durch die Vernetzung jeglicher Art von Geräten – das Internet der Dinge – notwendig gewordene Dezentralisierung.²⁰⁶ Die Idee besteht darin, die Algorithmen zu den Daten und nicht die Daten zu den Algorithmen zu bringen.²⁰⁷ Die zu bewältigenden rechenintensiven Computeraufgaben sollen von den zentralen Knoten und Rechenzentren hin zu den Punkten verschoben werden, an denen die Daten entstehen. Für die Datenanalyse in unmittelbarer Nähe der Datenquelle werden verschiedene informationstechnische Komponenten benötigt, die nachfolgend vorgestellt werden:²⁰⁸

- Geräteadapter: Komponente zur Umwandlung gerätespezifischer Protokolle in standardisierte Protokolle für den Fall, dass nicht bereits standardisierte Schnittstellen zur Geräteverwaltung und Datenkommunikation vorhanden sind.
- Netzwerkmodul: Komponente, die die Verbindung zur Cloud und damit zu Servern, Speicher und Services zur Verfügung stellt.
- Datenprozessor: Komponente, die die benötigte Rechenleistung zur Vorverarbeitung lokaler Daten bereitstellt.

Die Vorteile des Edge-Computing bestehen zum einen darin, dass Maschinenprotokolle IP-fähig gemacht werden können, indem mittels Edge Processing eine Verbindung zwischen Gerät und Backend in der Cloud hergestellt wird. Zum anderen besteht die Möglichkeit, Daten direkt lokal zu speichern und zu verarbeiten. Anschließend können die Daten automatisiert an die Cloud gesendet werden.²⁰⁹ Darüber hinaus ist die schnelle Echtzeitübertragung durch die kurze Distanz zu den Endgeräten und die sehr geringen Latenzzeiten insbesondere für datenintensive Anwendungen vorteilhaft. Beim Cloud-Computing steigt die Latenzzeit mit zunehmender Anzahl an Geräten und zunehmendem Datenvolumen stark an.²¹⁰

2.2.3 Smart Factory

Eine Vision, Industrie 4.0 in der Produktionstechnik umzusetzen, ist die Smart Factory. Die Grundlage bilden mehrere über das Internet der Dinge und Dienste miteinander vernetzte cyberphysische Systeme, die die Produktion in Echtzeit aufeinander abstimmen und planen. Zur Abbildung des aktuellen Zustands von Produkten, Systemen und Anlagen erfolgt eine umfassende Erhebung von Sensor- und Prozessdaten, die bei Bedarf mit anderen Wertschöpfungs-

²⁰⁶ Vgl. Munz; Stöger (Deterministische Machine-to-Machine Kommunikation im Industrie 4.0 Umfeld), 2017, S. 69-74.

²⁰⁷ Vgl. Schell (Industrie 4.0 mit SAP), 2017, S. 31-35.

²⁰⁸ Vgl. Pistorius (Industrie 4.0 - Schlüsseltechnologien Für Die Produktion), 2020, S. 18-21.; Vgl. Bitkom e. V. (Technologie Trends: Server, Speicher, Netzwerk), 2018, S. 4.; Vgl. Kubach (Device Clouds: Cloud-Plattformen schlagen die Brücke zwischen Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge), 2017, S. 193.

²⁰⁹ Vgl. Bates (Das Internet der Dinge im industriellen Kontext aus US-amerikanischer Sicht), 2017, S. 35.

²¹⁰ Vgl. Pistorius (Industrie 4.0 - Schlüsseltechnologien Für Die Produktion), 2020, S. 18-20.; Vgl. Martins; Kobylnska (IoT-Basics), 2019.

partnern geteilt werden können. Das Endprodukt sind smarte Produkte. Diese enthalten zusätzlich intelligente und vernetzte Leistungsmodule. Mit Hilfe dieser Module können sie bereits während des Fertigungsprozesses mit den smarten Fertigungssystemen und smarten Logistiklösungen sowie später mit anderen smarten Produkten in Echtzeit kommunizieren. Ein smartes Produkt ist in der Lage, sich selbstständig durch seinen Fertigungsprozess in der smarten Fabrik zu steuern. Dazu ist neben den smarten Produkten eine smarte Logistik notwendig. Autonom fahrende fahrerlose Fahrzeuge kommunizieren mit den smarten Produkten, die ihren Standort in Echtzeit abfragen können und wissen, zu welchem Zeitpunkt sie an welcher Bearbeitungsstation sein sollen. Durch die Kommunikation der smarten Produkte mit den smarten Fertigungssystemen und der smarten Logistik wird selbstständig eine Auftragsreihenfolge gebildet und abgearbeitet.²¹¹

Durch die Transformation hin zur Smart Factory sind in nahezu allen Bereichen der Wertschöpfung Einsparpotenziale realisierbar. Eine Steigerung der Gesamtproduktivität von bis zu 50 % halten SCHUH ET AL. für möglich.²¹² In der nachfolgenden Abbildung 18 sind die Kostensenkungspotenziale auf Basis der Smart Factory dargestellt.²¹³

<i>Kosten</i>	<i>Effekte</i>	<i>Potenziale</i>
<i>Bestandskosten</i>	• Reduzierung Sicherheitsbestände • Vermeidung Bullwhip- und Burbridge-Effekt	-30 % bis -40 %
<i>Fertigungskosten</i>	• Verbesserung OEE • Prozessregelkreise • Verbesserung vertikaler und horizontaler Personalflexibilität	-10 % bis -20 %
<i>Logistikkosten</i>	• Erhöhung Automatisierungsgrad (milk run, picking, ...)	-10 % bis -20 %
<i>Komplexitätskosten</i>	• Erweiterung Leitungsspannen • Reduktion trouble shooting	-60 % bis -70 %
<i>Qualitätskosten</i>	• Echtzeitnahe Qualitätsregelkreise	-10 % bis -20 %
<i>Instandhaltungskosten</i>	• Optimierung Lagerbestände für Ersatzteile • Zustandsorientierte Wartung (Prozessdaten, Messdaten) • Dynamische Priorisierung	-20 % bis -30 %

Abbildung 18: Abschätzung der Nutzenpotenziale der Smart Factory²¹⁴

²¹¹ Vgl. Steven (Industrie 4.0), 2019, S. 87.; Vgl. Soder (Use Case Production: Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0), 2014, S. 96-102.

²¹² Vgl. Schuh et al. (WGP-Standpunkt Industrie 4.0), 2016, S. 3.

²¹³ Vgl. Bauernhansl (Die Vierte Industrielle Revolution), 2017, S. 27.

²¹⁴ Vgl. Bauernhansl (Die Vierte Industrielle Revolution), 2017, S. 27.

Zur Implementierung einer Smart Factory gibt es verschiedene Ansätze. Ein Ansatz, auf den sich diese Arbeit stützt und der im Rahmen des Exzellenzclusters an der RWTH Aachen entwickelt wurde²¹⁵, ist die in Abbildung 19 dargestellte Referenzarchitektur Internet of Production (IoP). Sie besteht aus vier verschiedenen Ebenen, welche die Informationsaufbereitung von den Rohdaten bis hin zu Entscheidungshilfen beschreiben. Ferner geschieht dies entlang des aggregierten Produktlebenszyklus, von der Entwicklung bis hin zur Anwendung.

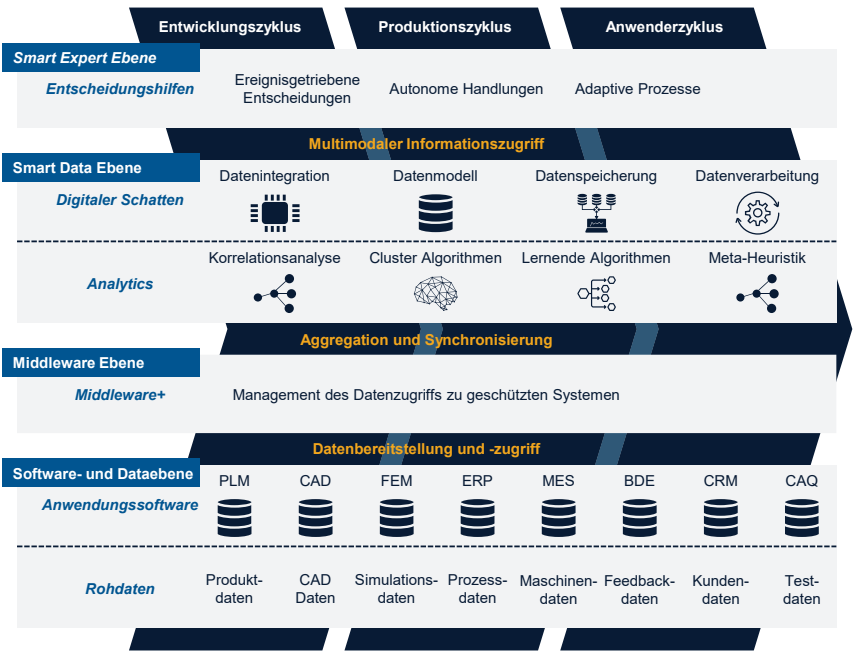


Abbildung 19: Referenzarchitektur IoP²¹⁶

2.2.4 Softwaresysteme

In industriell produzierenden Unternehmen werden verschiedenste Daten in unzähligen Systemen erfasst, viele davon haben einen direkten oder indirekten Bezug zum Betriebsmittel. In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Datentypen und Softwaresysteme anhand der Software- und Datenebene der vorgestellten Referenzarchitektur IoP näher erläutert. Der Lebenszyklus des zu fertigenden Produkts steht in unmittelbarem Zusammenhang mit den dazu verwendeten Betriebsmitteln, im Anwendungskontext mit dem dazu verwendeten Werkzeug sowie dem Lebenszyklus des Werkzeugs. Die Definition des Betriebsmittels Werkzeug sowie der Zusammenhang zwischen Serienprodukt und Werkzeug sind bereits ausführlich erläutert worden. Der Zusammenhang zwischen Produkt- und Werkzeuglebenszyklus ist auch gültig für

²¹⁵ Vgl. DFG (Exzellenzcluster 2023: Internet of Production (IoP)), 2018.
²¹⁶ Vgl. Schuh et al. (Change Request im Produktionsbetrieb), 2017, S. 121.

die Softwaresysteme und Daten. So sind die Daten, die während der Bereitstellungsphase des Produkts erfasst werden, gleichzeitig die Nutzungsdaten des Werkzeugs. Im Kontext dieser Arbeit wird der Fokus auf die für die Entwicklung einer Digitalen Werkzeugakte relevanten Systeme gelegt, hier maßgeblich die Enterprise-Resource-Planning-Systeme und Manufacturing-Execution-Systeme. In der nachfolgenden Abbildung 20 ist die Software- und Datenebene der Referenzarchitektur des IoP abgebildet.

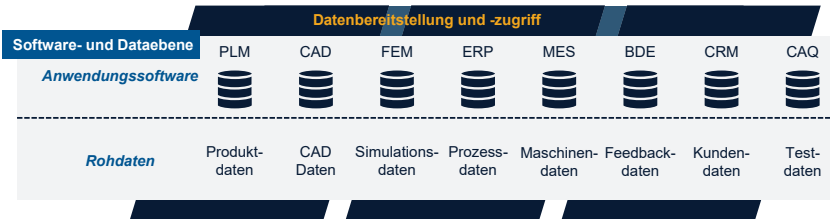


Abbildung 20: Software- und Datenebene der Referenzarchitektur IoP²¹⁷

Das Produktlebenszyklusmanagement (engl. Product-Lifecycle-Management-System, PLM) ist eine zentrale Anwendungssoftware in produzierenden Unternehmen. Das PLM-System übernimmt die Verwaltung von Produktdaten sowie Informationen zum Produkt und Prozessmanagement für den gesamten Produktlebenszyklus²¹⁸. Eine Kernaufgabe ist es, diese Informationen inklusive der Änderungshistorie und Variantenvielfalt abzubilden. Produktdaten und Informationen im PLM können beispielsweise Zeichnungen, Geometrien, Stücklisten oder Rohmaterialien darstellen. Das Ziel des PLM-Systems ist es, alle Phasen des Produktlebenszyklus durch eine einheitliche Herangehensweise zu unterstützen, basierend auf konsistenten Modellen, Methoden und Werkzeugen. Eine Vorstufe des PLM-Systems ist das Produktdatenmanagement (engl. Product-Data-Management-System, PDM), welches nur Daten entlang bestimmten Abschnitten des Produktlebenszyklus erfasst.²¹⁹

Ein wichtiges Anwendungssystem, dessen erzeugte Dateien im PLM abgelegt werden, ist das rechnerunterstützte Konstruieren (engl. Computer-Aided-Design-System, CAD). Diese Systeme ermöglichen das rechnergestützte Entwickeln von Entwürfen. Die Entwürfe werden in einem dreidimensionalen virtuellen Raum erzeugt und reduzieren die Entwicklungszeit drastisch.²²⁰ Auf Basis der Modelle können dann in kurzer Zeit Einzelteil- und Baugruppenzeichnungen inklusive Fertigungs- und Montagehinweisen erzeugt werden²²¹. Die mittels CAD-Systemen erzeugten Modelle werden in Simulationssoftwaresystemen benutzt, um verschiedene Berechnungen durchzuführen. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein oft genutzter Simulationsansatz und reduziert die Entwicklungszeit drastisch.²²²

²¹⁷ Vgl. Schuh et al. (Change Request im Produktionsbetrieb), 2017, S. 121.

²¹⁸ Vgl. Schuh et al. (Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme), 2014, S. 283.

²¹⁹ Vgl. Bracht et al. (Digitale Fabrik), 2018b, S. 8.; Vgl. Kurbel (Enterprise Resource Planning and Supply Chain Management), 2013, S. 6.

²²⁰ Vgl. Bracht et al. (Digitale Fabrik), 2018a, S. 3.

²²¹ Vgl. Klein (FEM), 2015, S. 46.

²²² Vgl. Klein (FEM), 2015, S. 1.

Die bisher erläuterten Systeme finden vornehmlich in der Produktentwicklung Einsatz. Das zentrale Anwendungsprogramm, welches die betriebswirtschaftlichen Kernaktivitäten eines Unternehmens unterstützt, ist das Geschäftsressourcenplanungs-System (engl. Enterprise-Resource-Planning-System, ERP). Zentrales Merkmal von ERP-Systemen ist die Integration und das Zusammenwirken der verschiedenen Aufgaben über eine gemeinsame Datenbank. Hierdurch werden Datenredundanzen vermieden und abteilungsübergreifende Geschäftsprozesse unterstützt.²²³ Die durch das Integrieren und Zusammenführen entstehende Datenbank wird auch als „Single Source of Truth“ bezeichnet²²⁴. Der hohe Grad der Integration von ERP-Systemen zeichnet sich in mehreren Dimensionen ab:²²⁵

- Datenintegration: Durch das Zusammenführen und Kombinieren der Datenmodelle und Datenbanken verwenden alle Abteilungen und/oder Geschäftsprozesse dieselben Datenentitäten mit denselben Werten.
- Funktionsintegration: Getrennte, zusammengehörige Funktionen werden miteinander verbunden oder zu einer Funktion zusammengefasst. So kann beispielsweise durch das Verbinden des CAD-Systems mit der Produktkalkulation der Konstruierende die Auswirkungen von Designentscheidungen auf die Produktkosten sofort erkennen und in seinen Konstruktionsprozess direkt miteinfließen lassen.
- Aktivitätsintegration: Aktivitäten, die logisch zusammengehören, werden miteinander verbunden oder synchronisiert. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn bei Auftragseingang für ein Produkt direkt in der Lagerwesen-Datenbank der Bestand des Produkts kontrolliert und, falls dieser nicht ausreichend ist, ein Fertigungsauftrag in der Produktion mit den nötigen Informationen aus dem Kundenauftrag automatisch ausgelöst wird.

Die verschiedenen Funktionen, welche die Geschäftsprozesse abbilden, sind in sogenannten Modulen gegliedert²²⁶. Welche Funktionen welchem Modul zugeordnet sind, unterscheidet sich je nach ERP-System²²⁷. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Informationen in der zentralen Datenbank werden in zwei Kategorien eingeteilt: Stamm- und Bewegungsdaten. Daten wie Materiallisten, Produkte, Maschinen oder auch Werkzeuge, Lieferanten und Kunden sind Stammdaten und sind für einen längeren Zeitraum gültig. Bewegungsdaten werden auf Basis von Stammdaten in Geschäftsprozessen erzeugt. Ein Beispiel sind Fertigungsaufträge, die den Prozess der Fertigung eines Produkts spezifizieren und mit den zu fertigenden Produkten, Maschinen und Werkzeugen verknüpft sind.²²⁸

Viele Prozesse und Daten werden im ERP-System nur in einem geringem Detaillierungsgrad abgebildet, um das System, welches umfangreiche Datenmengen aus verschiedenen Funktionen des Unternehmens zentralisiert speichert und verarbeitet, nicht zu überlasten. Die detaillierte Abbildung erfolgt dann in anderen Systemen. Es gilt jedoch immer, dass keine Daten

²²³ Vgl. Abts; Müller (Grundkurs Wirtschaftsinformatik), 2017, S. 193.

²²⁴ Vgl. Schuh et al. (Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme), 2014, S. 284.

²²⁵ Vgl. Kurbel (Enterprise Resource Planning and Supply Chain Management), 2013, S. 96.

²²⁶ Vgl. Abts; Müller (Grundkurs Wirtschaftsinformatik), 2017, S. 194.

²²⁷ Vgl. Kurbel (Enterprise Resource Planning and Supply Chain Management), 2013, S. 97.

²²⁸ Vgl. Jacob (ERP Value), 2008, S. 57.

redundant gelagert werden sollen und das ERP-System das führende Datenbanksystem nach dem Single-Source-of-Truth-Prinzip ist.

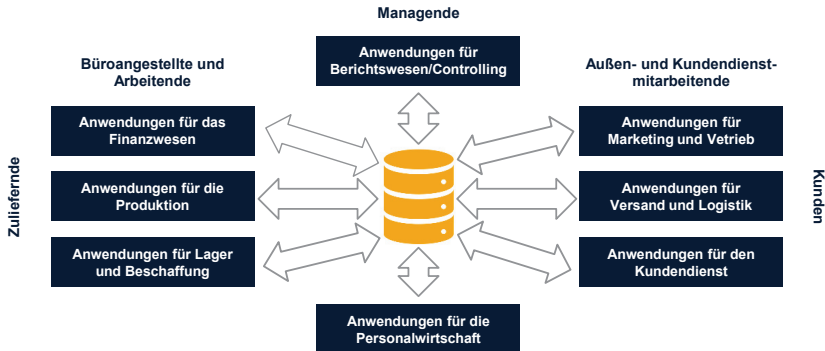


Abbildung 21: Struktur von ERP-Systemen²²⁹

Ein Beispiel für ein solches System ist das Fertigungsmanagementsystem (engl. Manufacturing Execution System, MES). Historisch ist dieses System durch die Integration von drei Einzelsystemen entstanden, der Fertigungssteuerung, dem computergestützten Qualitätsmanagement-System (engl. Computer-Aided-Quality-Assurance, CAQ) und der Betriebsdatenerfassung (BDE)²³⁰. Ob und wie diese Systeme in einem MES integriert sind, ist von Unternehmen zu Unternehmen verschieden²³¹. Das MES übernimmt verschiedene Aufgaben: Feinplanung und -steuerung, Informationsmanagement, Qualitätsmanagement, Personalmanagement, Betriebsmittelmanagement, Leistungsanalyse, Datenerfassung, Materialmanagement, Auftragsmanagement und Energiemanagement²³².

Das Betriebsmittelmanagement, welches auch Werkzeuge verwaltet, ist im Kontext der Digitalen Werkzeugakte hervorzuheben und lässt sich in drei Funktionen untergliedern: Betriebsmittelinformationen führen und verarbeiten, Betriebsmittel bereitstellen und technische Verfügbarkeit sichern. Wichtige Betriebsmittelinformationen stellen die Betriebsmittelstammdaten wie Inventarnummer, Standort, Dimensionen, Instandhaltungskriterien sowie die Betriebsmittelbewegungsdaten dar. Unter den Betriebsmittelbewegungsdaten sind Daten wie die Verknüpfung der genutzten Betriebsmittel mit dem jeweiligen Auftrag und/oder Maschine, die erreichten Betriebsstunden bzw. Standmenge sowie Betriebsmittelhierarchien zu verstehen.²³³

Das BDE-System, welches als Teil eines integrierten MES oder als eigenständiges System implementiert sein kann, erfasst z. B. Start- und Endzeiten eines Fertigungsauftrages, Rüs-

²²⁹ Vgl. Abts; Mülder (Grundkurs Wirtschaftsinformatik), 2017, S. 165.

²³⁰ Vgl. Kurbel (Enterprise Resource Planning and Supply Chain Management), 2013, S. 6.

²³¹ Vgl. Kurbel (Enterprise Resource Planning and Supply Chain Management), 2013, S. 191.

²³² Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 5600), 2016, S. 8.

²³³ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 5600), 2016, S. 30-32.

tungs- und Prozesszeiten aller ausgeführten Arbeitsschritte oder auch Ausschuss- und Gut-mengen.²³⁴ Das CAQ-System ist das zentrale Qualitätsmanagementtool und verwaltet Daten zu Inspektionsplänen/Prüfplänen und deren Ergebnisse. Dies beinhaltet beispielsweise Anga-ben, welche Produkte, wann, wie oft, mit welchen Prüfmitteln zu kontrollieren sind, Sollwerte sowie die Prüfwerte. Ferner fallen auch Wareneingangsprüfungen darunter.²³⁵ CAQ-Systeme können, wie BDE-Systeme auch, im MES integriert oder als eigenständige Systeme imple-mentiert sein. Das Kundenbeziehungsmanagement-System (engl. Customer-Relationship-Management-System, CRM) plant, terminiert und kontrolliert die Aktivitäten eines Unterneh-mens in der Vorverkaufsphase und im After-Sales²³⁶. Teile der Stammdaten wie Kundenname oder Aufträge werden im ERP-System verwaltet. Detailliertere Daten wie potenzielle zukünf-tige Projekte oder Angaben zu Ansprechpartnern sind im CRM-System hinterlegt.

Die soeben erläuterten Systeme können die Daten auf unterschiedlichen Weisen erfassen. Grundsätzlich lässt sich die Datenerfassung in drei verschiedene Arten gliedern:²³⁷

- Manuell: Ein Mitarbeitender gibt die Daten über eine Schnittstelle ein. Ein Beispiel ist das erstmalige Erfassen von Kundennamen im ERP-System. Die Daten werden von einem Mitarbeiter über einen PC in das System eingegeben.
- Halbautomatisch: Ein Mitarbeitender ist noch gefordert, wird jedoch durch Werkzeuge aktiv unterstützt. Ein Beispiel ist das Erfassen des genutzten Rohmaterials in der Pro-duktion mittels eines Handscanners, der den Barcode auf dem Material erkennt und automatisch an das IT-System weiterleitet.
- Automatisch: Ein Informationssystem sendet die Daten über ein Netzwerk automatisch. Ein Beispiel ist das automatische Zurückmelden von Maschinenprozessparametern von der Maschine direkt oder von Sensoren an das MES.

Die Datenqualität von manuell erfassten Daten ist oft schlecht. Bei der manuellen Datenerfas-sung können Flüchtigkeitsfehler auftreten. Zudem ist die manuelle Datenerfassung oft mühse-lig und wird so von Mitarbeitenden vernachlässigt. Die Datenqualität von automatisch oder halbautomatisch erfassten Daten ist dem gegenüber oft besser, vorausgesetzt das Erfas-sungssystem ist korrekt ausgelegt und implementiert. Viele Datenerfassungsschritte, speziell in der Produktion und Logistik, können automatisch oder halbautomatisch erfasst werden. Je-doch ist dies oft noch nicht der Fall, da hohe Anfangsinvestitionen für den Aufbau der dafür nötigen digitalen Infrastruktur notwendig sind. Dazu zählen beispielsweise die Software, der Scanner und ein Server.²³⁸

2.3 Data Analytics

Im vorangegangenen Kapitel wird das Themenfeld Industrie 4.0 vorgestellt und erläutert, wel-che Daten mit welchen Mitteln in der Smart Factory erfasst werden. In diesem Kapitel wird die Auswertung und Analyse der Daten näher betrachtet. Dazu werden zunächst im Kontext dieser

²³⁴ Vgl. Schuh et al. (Achieving Higher Scheduling Accuracy), 2014, S. 143.

²³⁵ Vgl. Kurbel (Enterprise Resource Planning and Supply Chain Management), 2013, S. 205.

²³⁶ Vgl. Finnegan; Willcocks (Implementing CRM), 2007, S. 4.

²³⁷ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 5600), 2016, S. 40.

²³⁸ Vgl. Schuh et al. (Achieving Higher Scheduling Accuracy), 2014, S. 142.

Arbeit die relevantesten Begriffe im Themenfeld Data Analytics definiert. Daraufhin wird das Thema Datenmanagement genauer erläutert und verschiedene Methoden der Datenanalyse und -verarbeitung vorgestellt. Den Abschluss des Kapitels bildet die Vorstellung ausgewählter Vorgehensmodelle im Anwendungszusammenhang.

2.3.1 Begriffsdefinition und Abgrenzung

Data Science, Data Analytics und Data Mining sind Begriffe, die oft synonym verwendet werden. Sie beschreiben die Analyse von Datenmengen mittels Computer Systemen zur Gewinnung von Erkenntnissen.²³⁹ Im Folgenden werden diese Begriffe im Zusammenhang mit Big Data sowie den Begriffen Business-Intelligenz, Business-Analytics, Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen genauer erläutert sowie der Datenlebenszyklus vorgestellt.

2.3.1.1 Data Science

Data Science ist charakterisiert durch den Prozess der Wissensextraktion aus bestehenden Daten. Die Domäne vereint die drei Disziplinen Statistik, Mathematik und Informationstechnologie. Das primäre Ziel besteht darin, das extrahierte Wissen so weit aufzubereiten, dass der Entscheidende die relevanten Informationen erfassen und interpretieren kann. Im Spektrum von Data Science sind insbesondere die Themenfelder Data Analytics und Data Mining subsumiert. Darüber hinaus existieren signifikante Überschneidungen zu den angrenzenden Bereichen Big Data und Machine Learning.²⁴⁰

2.3.1.2 Data Analytics

Als Unterbereich der Data Science stellt Data Analytics einen sich fortlaufend entwickelnden Bereich der Wissenschaft dar, welcher sich maßgeblich auf die Methoden der Statistik, Algorithmik und Informationstechnologie stützt, um Strukturen in umfangreichen Datensätzen zu identifizieren. Für eine effiziente Anwendung von Data Analytics ist eine spezifische Fachkenntnis des jeweiligen Anwendungssektors unabdingbar. Es ist die Wissenschaft der Exploration großer Datenmengen, gemeinhin als Big Data bezeichnet, und die Entwicklung von Methoden und Algorithmen für die Erkennung von Strukturen und Informationen. Dieser Ansatz zielt darauf ab, datengetriebene Modelle zu entwickeln, die das Verhalten von Daten reflektieren und verwendet werden können, um Informationen zu extrahieren, Schlussfolgerungen zu ziehen und Entscheidungen zu treffen. Somit leistet Data Analytics einen essenziellen Beitrag zu den Bereichen des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz.²⁴¹

2.3.1.3 Data Mining

Data Mining stellt ein weiteres Subgebiet von Data Analytics dar. Es ist charakterisiert durch die Anwendung fortgeschrittener statistischer Verfahren auf existierende Datenbestände mit dem primären Ziel, bisher unerkanntes Wissen zu extrahieren. Die Zielsetzung des Ansatzes

²³⁹ Vgl. Runkler (Data Analytics), 2020, S. 2.; Vgl. van der Aalst (Data Science in Action), 2016, S. 10.

²⁴⁰ Vgl. Niebler; Lindner (Datenbasiert entscheiden), 2022, S. 7-9.

²⁴¹ Vgl. Mathar et al. (Fundamentals of Data Analytics), 2020, S. 5-7.

liegt darin begründet, bestimmte Regelmäßigkeiten zu erkennen und verborgene Zusammenhänge zu identifizieren. Die hierbei detektierten Muster bedürfen einer akkuraten Interpretation, um ihre Relevanz und ihren Informationswert valide einschätzen zu können.²⁴² Data Mining ist ein interdisziplinäres Forschungsgebiet, dessen Definition und Interpretation variieren kann, abhängig von den jeweiligen Kontexten und Anwendungsbereichen²⁴³.

2.3.1.4 Big Data

Big Data bezeichnet Daten, welche sich durch große Mengen, große Heterogenität und hohe Frequenz auszeichnen und spezifische Technologien und Analysemethoden zur Verarbeitung benötigen²⁴⁴. Die Eigenschaften von Big Data werden als die drei Vs bezeichnet und oft noch um weitere Eigenschaften ergänzt z. B. dem Begriff Veracity (engl. Richtigkeit/Genauigkeit)²⁴⁵. Die vier genannten Eigenschaften von Big Data sind in Abbildung 22 dargestellt.

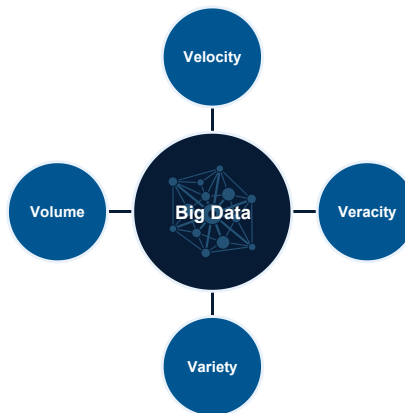


Abbildung 22: Eigenschaften von Big Data²⁴⁶

2.3.1.5 Business-Intelligenz und Business-Analytics

Unter dem Begriff Business-Intelligenz wird eine Sammlung von Techniken und Methoden verstanden, mithilfe derer verwertbare Informationen aus Geschäftsprozessen extrahiert und auf Basis derer nachvollziehbare Entscheidungen getroffen werden können. Der Fokus liegt auf der Analyse vergangener Ereignisse. Bezogen auf das Industrie-4.0-Reifegrad-Modell in Kapitel 2.2.1.1 beschränkt sich Business-Intelligenz auf die beiden Stufen Sichtbarkeit und Transparenz. Business-Analytics erweitert den Fokus von Business-Intelligenz um die automatische und datenbasierte Erstellung von Prognosemodellen, die auch Predictive und Prescriptive

²⁴² Vgl. Niebler; Lindner (Datenbasiert entscheiden), 2022, S. 10.

²⁴³ Vgl. Han et al. (Data mining), 2011, S. 5-8.

²⁴⁴ Vgl. Mauro et al. (A formal definition of Big Data), 2016, S. 122.

²⁴⁵ Vgl. van der Aalst (Data Science in Action), 2016, S. 10.

²⁴⁶ Eigene Darstellung

Analytics oder Prognosefähigkeit und Adaptierbarkeit genannt werden. Dafür sind zusätzliche Kompetenzen wie die KI-Technik Machine-Learning notwendig.²⁴⁷

2.3.1.6 Künstliche Intelligenz

Künstliche Intelligenz (KI) ist ein Oberbegriff für verschiedenste Werkzeuge, Algorithmen, Techniken und Anwendungen mit der übergeordneten Zielsetzung, die zugrundeliegenden Mechanismen von Intelligenz zu begreifen und darauf aufbauend intelligente Entitäten zu entwickeln.²⁴⁸ Für diese Arbeit wird die Definition nach RICH & KNIGHT angewendet, nach der sich KI damit befasst, Computer Tätigkeiten durchführen zu lassen, die Menschen momentan noch besser können.²⁴⁹ Darüber hinaus wird zwischen starker und schwacher KI unterschieden. Schwache KI kann Intelligenz simulieren und sich innerhalb eines Problemraums sinnvoll verhalten. Mit starker KI werden technische Entitäten bezeichnet, die im eigentlichen Sinne des Wortes denken und ein Bewusstsein entwickeln können. Momentan beschränkt sich der Stand der Technik ausschließlich auf schwache Intelligenz. Starke KI wird noch für eine Zukunftstechnologie gehalten.²⁵⁰ Das Bindeglied zwischen Business-Analytics und KI ist das maschinelle Lernen als Teilgebiet der KI-Forschung. Beispielsweise kann ein Supervised-Learning-Algorithmus anhand eines Beispieldatensatzes die komplexen Zusammenhänge von Input-Daten und Resultaten lernen, um in Zukunft eigene Aussagen treffen zu können und mithilfe des Erkenntnisgewinns einen wirtschaftlichen Nutzen zu schaffen.²⁵¹

2.3.1.7 Maschinelles Lernen

Machine Learning (ML), ein Begriff, der erstmals 1959 von dem amerikanischen Informatiker Arthur Samuel geprägt worden ist. Er beschreibt die Fähigkeit eines Computers, Strukturen aus Datenbeständen zu erlernen, ohne explizit programmiert worden zu sein. Das primäre Ziel von Machine Learning ist es, basierend auf Trainingsdatensätzen prädiktive Modelle zu entwickeln. Der Ausgabewert solcher Modelle kann entweder kontinuierlicher oder diskreter Natur sein.²⁵² Mithilfe von Methoden aus der Statistik und Analysis wird der menschliche Lernprozess simuliert, um Programme zu erstellen, die komplexe Zusammenhänge abbilden können.²⁵³ Der Lernprozess kann dabei mithilfe unterschiedlicher Strategien erfolgen, die Teile des menschlichen Lernprozesses nachahmen. Unterschieden werden die vier Lernverfahren Supervised Learning, Unsupervised Learning, Reinforcement Learning und Ensemble Learning. In der nachfolgenden Tabelle 1 werden die unterschiedlichen Lernverfahren definiert und anhand eines intelligenten Agenten, der Taxifahren lernen soll, beispielhaft erläutert.^{254,255}

²⁴⁷ Vgl. Benning; Wenger (Smart-Data-Management), 2022, S. 179-180.; Vgl. van der Aalst (Data Science in Action), 2016, S. 3-23.

²⁴⁸ Vgl. Russell; Norvig (Artificial intelligence), 2016, S. 1-4.

²⁴⁹ Vgl. Knight et al. (Artificial Intelligence), 2009, S. 1-533.

²⁵⁰ Vgl. Russell; Norvig (Artificial intelligence), 2016, S. 1020-1033.

²⁵¹ Vgl. Akerkar (Artificial intelligence for business), 2019, S. 1-81.

²⁵² Vgl. Balali et al. (Machine Learning Principles), 2020, S. 115-118.

²⁵³ Vgl. Burgess (The Executive Guide to Artificial Intelligence), 2018, S. 19-23.

²⁵⁴ Vgl. Russell; Norvig (Artificial intelligence), 2016, S. 34-59.

²⁵⁵ Vgl. Benning; Wenger (Smart-Data-Management), 2022, S. 181-183.

Lernverfahren	Definition	Analogie	Beispiel-Algorithmus
Supervised Learning	Erlernen einer Zuordnungsfunktion anhand von repräsentativen Input-Output-Paaren	Lehrer zeigt und erklärt: „Dieses Fahrzeug ist ein Bus“. Agent lernt, generell Busse zu erkennen	Die meisten Neuronalen Netzwerke, Support Vector Machines
Unsupervised Learning	Erkennen von Mustern und Strukturen ohne Feedback	Agent erlernt implizit die Konzepte „schlechte Verkehrssituation“ und „gute Verkehrssituation“, ohne dass ihm dies vorgegeben wird	Cluster-Analyse, Auto-Encoder
Reinforcement Learning	Indirektes Lernen anhand einer Belohnungsfunktion	Agent lernt anhand von Trinkgeldern am Ende der Fahrt, was eine „angenehme Fahrweise“ ist	Markov-Modell
Ensemble Learning	Zusammenschalten von mehreren Lernverfahren	Kombination der zuvor genannten Lernverfahren	Boosting, Decision Jungle

Tabelle 1: Übersicht Lernverfahren²⁵⁶

Über die vier vorgestellten Lernverfahren hinaus gibt es noch viele weitere Zwischen- und Ausbaustufen, die jedoch an dieser Stelle nicht betrachtet werden. Für detaillierte Ausführungen zu dem angeführten Beispiel wird auf das Werk von RUSSELL UND NORVIG verwiesen.²⁵⁷ In Kapitel 2.3.3 wird detaillierter auf die einzelnen Methoden der Datenanalyse eingegangen.

2.3.1.8 Smart Data

Die zuvor angesprochenen Herausforderungen von Big Data wie beispielsweise die Heterogenität, das Volumen oder die Kurzlebigkeit der Daten zeigen, dass es sich bei Big Data lediglich um einen „Rohstoff“ handelt, der erst nach erfolgter Veredelung gewinnbringend genutzt werden kann. Das Ergebnis der notwendigen intelligenten Verarbeitung sind veredelte Daten, die auch Smart Data genannt werden. Der Nutzen von Smart Data liegt beispielsweise in der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle durch eine zielgerichtete Analyse bereits vorhandener Datenmengen oder einem besseren Kundenverständnis.²⁵⁸ Nach JÄHNICHEN wird die Veredelung der Daten zu Smart Data durch Semantik²⁵⁹, wirtschaftlichen Nutzen, Datenqualität sowie Datensicherheit und -schutz bewirkt.²⁶⁰ In der nachfolgenden Abbildung 23 ist die Veredelung des Rohstoffs Big Data zu Smart Data dargestellt.²⁶¹

²⁵⁶ Vgl. Benning; Wenger (Smart-Data-Management), 2022, S. 183.; i.A.a. Russell; Norvig (Artificial intelligence), 2016, S. 34-59.
²⁵⁷ Vgl. Russell; Norvig (Artificial intelligence), 2016.
²⁵⁸ Vgl. Jähnichen (Von Big Data zu Smart Data – Herausforderungen für die Wirtschaft), 2015.
²⁵⁹ Erfassung von Metadaten durch ein geeignetes Datenmodell zur Gewährleistung von Kontext
²⁶⁰ Vgl. Jähnichen (Von Big Data zu Smart Data – Herausforderungen für die Wirtschaft), 2015, S. 1-2.
²⁶¹ Vgl. Benning; Wenger (Smart-Data-Management), 2022, S. 187-188.

Begrifflichkeiten definiert. Anschließend folgt die Herleitung der Eigenschaften eines Datenbankmanagementsystems sowie die Vorstellung verschiedener Datenmodelle. Das Kapitel wird abgeschlossen mit der Vorstellung und Abgrenzung der beiden Konzepte Data Lake und Data Warehouse.

2.3.2.1 Definition der relevanten Begrifflichkeiten

Für ein besseres Verständnis werden die relevanten Begriffe im Anwendungskontext erläutert. Dazu wird zunächst die Information als Produktionsfaktor eingeführt und anschließend das zur Verwaltung und zum Management der Informationen notwendige Datenbankmanagementsystem sowie die dazugehörigen Begriffe Datenstruktur, Datenbankausprägung und Datenbankschema erläutert.

Der Wandel von der Industrie- zur Informations- und Wissensgesellschaft spiegelt sich insbesondere in der Bewertung der Information als Produktionsfaktor wider. Im Gegensatz zu materiellen Wirtschaftsgütern ist die Information durch die nachfolgend beschriebenen Eigenschaften gekennzeichnet. Die Darstellung der Information wird durch Daten, zum Beispiel als Zeichen, Signale, Nachrichten oder Sprachelemente, spezifiziert. Die Verarbeitung der Information kann mithilfe von Algorithmen²⁶⁴ und Datenstrukturen übermittelt, gespeichert, klassifiziert, aufgefunden und in andere Darstellungsformen transformiert werden. Die Information ist beliebig kombinierbar. Die Herkunft einzelner Teile ist nicht nachweisbar. Manipulationen sind so jederzeit möglich. Die Information unterliegt keinem physischen Alterungsprozess, ist beliebig kopierbar und kennt keine Originale. Zudem ist sie oft unscharf, d.h. sie ist oft unpräzise und ihre Aussagekraft variiert. Die Information benötigt keinen fixierten Träger, d.h. sie ist unabhängig vom Ort. Diese Eigenschaften belegen, dass sich digitale Güter in Form von Daten in der Handhabung sowie in der ökonomischen und rechtlichen Wertung von materiellen Gütern stark unterscheiden. Physische Produkte verlieren durch Nutzung meistens an Wert, wohingegen die Nutzung von Informationen zu einem Wertzuwachs führen kann. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass materielle Güter mit mehr oder weniger hohen Kosten hergestellt werden. Im Gegensatz dazu ist die Vervielfältigung von Informationen einfach und kostengünstig. Dies führt dazu, dass die Eigentumsrechte und Besitzverhältnisse schwer zu bestimmen sind, obwohl digitale Wasserzeichen und andere Datenschutz- und Sicherheitsmechanismen zur Verfügung stehen.

Fasst man Daten als die Grundlage von Information als Produktionsfaktor im Unternehmen auf, so hat das wichtige Konsequenzen. Daten bilden Entscheidungsgrundlagen und sind somit in allen Organisationsfunktionen von Bedeutung. Daten können aus unterschiedlichen Quellen zugänglich gemacht werden. Die Qualität der Information ist abhängig von der Verfügbarkeit, Korrektheit und Vollständigkeit der Daten. Durch das Sammeln, Speichern und Verarbeiten von Daten fallen Aufwände und Kosten an. Aufgabengebiete und -träger jeder Organisation sind durch Informationsbeziehungen miteinander verknüpft. Der Erfüllungsgrad einer Aufgabe ist damit in hohem Maße vom Integrationsgrad der Daten abhängig. Wenn Daten als Produktionsfaktor betrachtet werden, muss diese Ressourcen geplant, gesteuert, überwacht

²⁶⁴ Berechnungsvorschriften

und kontrolliert werden.²⁶⁵ Dazu kann beispielsweise ein Datenbankmanagementsystem eingesetzt werden, das nachfolgend definiert wird.

Ein Datenbankmanagementsystem (DBMS) ist eine Software zur applikationsunabhängigen Beschreibung, Speicherung und Abfrage von Daten. Jedes Datenbanksystem besteht aus einer Speicherungs- und einer Verwaltungskomponente. Die Speicherungskomponente umfasst alle Daten, die in einer organisierten Form abgespeichert werden sowie deren Beschreibung. Die Verwaltungskomponente enthält eine Abfrage- und eine Manipulationssprache, um die Daten und Informationen auswerten und verändern zu können. Die Verwaltungskomponente bedient nicht nur die Benutzerschnittstelle, sondern verwaltet auch Zugriffs- und Bearbeitungsrechte der Anwendenden.²⁶⁶

Die Datenbankausprägung drückt den momentan gültigen Zustand der Datenbasis aus. Sie unterliegt den im Schema festgelegten Strukturbeschreibungen. Änderungen am einmal festgelegten Datenbankschema sind sehr selten, wohingegen die Datenbankausprägung einer laufenden Modifikation unterliegt.²⁶⁷ Eine Datenstruktur ist ein formalisiertes Objekt, welches das Schema der abgespeicherten Datenobjekte festlegt.²⁶⁸

2.3.2.2 Eigenschaften eines Datenbankmanagementsystems

Heutzutage gibt es für die meisten Unternehmen und Organisationen keine Alternativen mehr zum Einsatz eines einheitlichen, die gesamte Informationsverarbeitung abdeckenden DBMS. Ohne die Nutzung eines solchen Systems müssten die auf vielfältiger Art miteinander in Beziehung stehenden Daten als isolierte Dateien auf verschiedenen Computern abgelegt werden, was zu den unterschiedlichsten Herausforderungen führen würde.²⁶⁹ Nachfolgend werden fünf dieser Herausforderungen genannt und die zentralen Eigenschaften eines Datenbankmanagementsystems abgeleitet:²⁷⁰

Die erste Herausforderung ist die Redundanz und Inkonsistenz der Daten. Wenn Daten in isolierten Dateien abgelegt werden, müssen dieselben Informationen bzgl. eines Anwendungsobjektes oft mehrfach, das heißt redundant abgespeichert werden. Bei Änderungen der Daten kann dies zu Inkonsistenzen führen, wenn nur eine Kopie der Daten geändert wird. In einem globalen, integrierten DBMS wird diese Art von unkontrollierter Redundanz vermieden.

Die zweite Herausforderung sind die beschränkten Zugriffsmöglichkeiten. Es ist sehr aufwändig, die in isolierten Dateien abgelegten Daten miteinander zu verknüpfen. Bei einem homogen integrierten DBMS wird die gesamte Information einer Organisation einheitlich modelliert, sodass sich diese Daten sehr flexibel miteinander verknüpfen lassen.

²⁶⁵ Vgl. Meier; Kaufmann (Datenmanagement), 2016, S. 1-2.

²⁶⁶ Vgl. Abts; Müller (Grundkurs Wirtschaftsinformatik), 2017, S. 161.; Vgl. Meier; Kaufmann (Datenmanagement), 2016, S. 2-3.

²⁶⁷ Vgl. Kemper; Eickler (Datenbanksysteme), 2015, S. 26.

²⁶⁸ Vgl. Schuh et al. (WGP-Standpunkt Industrie 4.0), 2016, S. 26.; Vgl. Güting (Einführung), 1992, S. 1-2.

²⁶⁹ Vgl. Kemper; Eickler (Datenbanksysteme), 2015, S. 21.

²⁷⁰ Vgl. Abts; Müller (Grundkurs Wirtschaftsinformatik), 2017, S. 162.; Vgl. Kemper; Eickler (Datenbanksysteme), 2015, S. 21-22.; Vgl. Stahlknecht (Datenorganisation), 1985, S. 139.

Die dritte Herausforderung ist der Mehrbenutzerbetrieb. Die heutigen Dateisysteme bieten entweder gar keine oder nur sehr rudimentäre Kontrollmechanismen für den Mehrbenutzerbetrieb. Daten werden aber im Allgemeinen von sehr vielen Anwendenden innerhalb und außerhalb des jeweiligen Unternehmens genutzt. Bei unkontrolliertem Zugriff kann es sehr leicht zu unerwünschten Anomalien kommen, z. B. wenn zwei Benutzer gleichzeitig die gleiche Datei editieren. Um solche und weitere Anomalien des Mehrbenutzerbetriebs auszuschließen, bieten Datenbankverwaltungssysteme eine Mehrbenutzerkontrolle.

Die vierte Herausforderung ist der Verlust von Daten. Wenn Daten in isolierten Dateien gehalten werden, wird die Wiederherstellung eines konsistenten Zustands der Gesamtinformationsmenge im Fehlerfall sehr schwierig. Im Allgemeinen bieten Dateisysteme bestenfalls die Möglichkeit einer periodisch durchgeführten Sicherung der Dateien. Datenverluste, die während der Bearbeitung von Dateien oder nach der letzten Sicherungskopie auftreten, sind in der Regel nicht auszuschließen. Datenbankverwaltungssysteme besitzen eine ausgefeilte Recoverykomponente, welche den Benutzenden für alle vorhersehbaren Fehlerfälle vor Datenverlust schützen soll.

Die fünfte Herausforderung sind Sicherheitsprobleme. Nicht alle Benutzenden sollten Zugriff auf die gesamten gespeicherten Daten haben oder das Privileg, diese zu verändern. Datenbankverwaltungssysteme bieten die Möglichkeit, einzelnen Benutzern oder Benutzergruppen bestimmte Zugriffsrechte zu übertragen.

2.3.2.3 Datenmodelle als Basis für Datenbankmanagementsysteme

Die Datenmodellierung hat zum Ziel, die Unternehmensdaten in einem Datenmodell zu beschreiben. Sie findet noch vor jeglicher Umsetzung bzw. Implementierung von Lösungen zum Management der Daten statt. Es ist essentiell, die vorhandenen Daten vollständig und systematisch zu modellieren, da Versäumnisse während der Modellierung in späteren Phasen der Umsetzung zu sehr teuren Anpassungen führen oder im schlimmsten Fall nicht mehr korrigiert werden können.²⁷¹ Auf welche Art und Weise Daten in einem Datenbanksystem gespeichert und modifiziert werden können, definiert ein Datenbankmodell. Grundsätzlich lässt sich zwischen drei verschiedenen Datenmodellen unterscheiden:²⁷²

- Hierarchisches Datenmodell: Es weist eine Baumstruktur auf und lässt sich einfach auf physikalischen Speicherstrukturen abbilden. Nachteil dieser Struktur ist, dass die Realität nicht immer als Hierarchie abgebildet werden kann.
- Netzwerkdatenmodell: Es weist eine Graphenstruktur auf. Vorteilhaft ist die bessere Darstellung des realen Anwendungsfalls. Die Abbildung von Graphen auf physikalischen Speichern ist schwieriger.
- Relationales Datenmodell: Es weist eine Tabellenstruktur auf, die alle Objekte und deren Beziehungen abbildet. Dies führt zu einer übersichtlichen Darstellung. Die Abbildung auf physikalischen Speichern ist einfach umzusetzen.

²⁷¹ Vgl. Kemper; Eickler (Datenbanksysteme), 2011, S. 495-540.

²⁷² Vgl. Engesser (Duden Informatik), 1993, S. 163-164.

Das relationale Datenmodell ist das heute am meisten genutzte Modell in Datenbanksystemen²⁷³. Es basiert auf mathematisch beschriebenen Tabellen, ihrer Verknüpfung über sogenannte Relationen sowie relationaler Algebra, die die Operationen beschreibt.²⁷⁴ Zunehmend gewinnen auch nicht relationale Datenbanken an Bedeutung²⁷⁵. Diese sind entstanden durch die neuen Anforderungen an Datenbanken, welche sich durch die V-Eigenschaften von Big Data, siehe Kapitel 2.3.1.4, ergeben. Nicht relationale Datenbanken zeichnen sich durch eine hohe Spezialisierung aus und geben so der hohen Bandbreite an Big-Data-Formaten Flexibilität.²⁷⁶ Für den Rahmen dieser Arbeit stellen sie eine untergeordnete Rolle dar, da im Produktionskontext meist Daten in relationalen Datenbanken gespeichert werden.

2.3.2.4 Aufbau und Modellierung eines Datenbankmanagementsystems

Die folgenden Erläuterungen zur Modellierung basieren auf HAHNE²⁷⁷. Der Prozess zur Überführung von Prozessen und deren Daten aus der realen Welt in eine Datenbank kann in die drei Modellierungsebenen semantisches, logisches und physisches Datenmodell strukturiert werden.

Die semantische Ebene ist der Realität am nächsten. Sie ist eine Abstrahierung der Realität und berücksichtigt noch nicht das später einzusetzende Datenmodell, z. B. hierarchisch oder relational. Zur Modellierung eignen sich besonders das Entity-Relationship-Modell (ERM) sowie die Unified Modeling Language (UML). Das weit verbreitetste semantische Modell ist das Entity-Relationship-Modell nach CHEN.²⁷⁸

Auf der logischen Ebene, die auch Implementationsebene genannt wird, wird der konzeptuelle Entwurf in das spezielle Datenmodell des zum Einsatz kommenden Datenbanksystems übertragen. Grundsätzlich stellt ein Datenmodell die Infrastruktur für die Modellierung der realen Welt zur Verfügung, indem es die Modellierungskonstrukte festlegt, mit denen man ein computerisiertes Informationsabbild der realen Welt generieren kann. Es umfasst sowohl die Beschreibung der Datenobjekte als auch die Festlegung der anwendbaren Operatoren und deren Wirkung. Das logische Modell ist zudem bereits ausgerichtet auf die spätere Datenbanktechnologie. Zusammengefasst verhält sich ein Datenmodell wie eine Programmiersprache, die Typkonstruktoren und Sprachkonstruktoren festlegt, mit deren Hilfe man spezifische Anwendungsprogramme realisiert.²⁷⁹ Das für relationale Datenbanken maßgeblich logische Modell basiert auf CODD aus dem Jahre 1970.²⁸⁰

²⁷³ Vgl. Abts; Müller (Grundkurs Wirtschaftsinformatik), 2017, S. 169.

²⁷⁴ Vgl. Brodie; Zilles (Proceedings of Workshop on Data Abstraction, Databases, and Conceptual Modelling), 1980, S. 112-114.

²⁷⁵ Vgl. Li; Manoharan (A performance comparison of SQL and NoSQL databases), 2013, S. 15.

²⁷⁶ Vgl. Gölzer (Big Data in Industrie 4.0), 2017b.

²⁷⁷ Vgl. Hahne (Logische Modellierung mehrdimensionaler Datenbanksysteme), 2002, S. 9.

²⁷⁸ Vgl. Krcmar (Informationsmanagement), 2015, S. 70-71.; Vgl. Kurbel (Enterprise Resource Planning and Supply Chain Management), 2013, S. 337.; Vgl. Chen (The entity-relationship model - toward a unified view of data), 1976.

²⁷⁹ Vgl. Kemper; Eickler (Datenbanksysteme) 2015, S. 25.

²⁸⁰ Vgl. Codd (A relational model of data for large shared data banks), 1970.

Auf der physischen Ebene, die für den normalen Benutzenden eines Datenbanksystems nicht relevant ist, liegt der Fokus auf der Steigerung der Leistungsfähigkeit der Datenbankanwendung, indem festgelegt wird, wie die Daten gespeichert werden. Voraussetzung für Arbeiten an der physischen Ebene sind tiefgehende Kenntnisse des eingesetzten Datenbanksystems, des zugrundeliegenden Betriebssystems und sogar der Hardware.²⁸¹ Es werden z. B. Tabellen denormalisiert, um Zugriffszeiten zu optimieren. Das entwickelte relationale Datenmodell kann in verschiedenen Datenbanksoftwaredistributionen implementiert werden. Alle diese verwenden eine Datenbanksprache, um Daten hinzuzufügen, zu ändern, zu löschen oder abzurufen. Am weitesten verbreitet ist die durch das American National Standards Institute genormte strukturierte Abfrage Sprache (engl. Structured Query Language, SQL), die für alle bekannten relationalen Datenbanksysteme verfügbar ist. Relationale Datenbanksysteme werden deshalb auch als SQL-Datenbanken bezeichnet.²⁸² Die oben erläuterten nicht relationalen Datenbanken werden oft als nicht nur SQL (engl. Not only SQL, NoSQL) Datenbanken bezeichnet.²⁸³ In der nachfolgend dargestellten Abbildung 25 sind die drei genannten Ebenen sowie dafür beispielhaft genutzte Modelle und Methoden dargestellt.

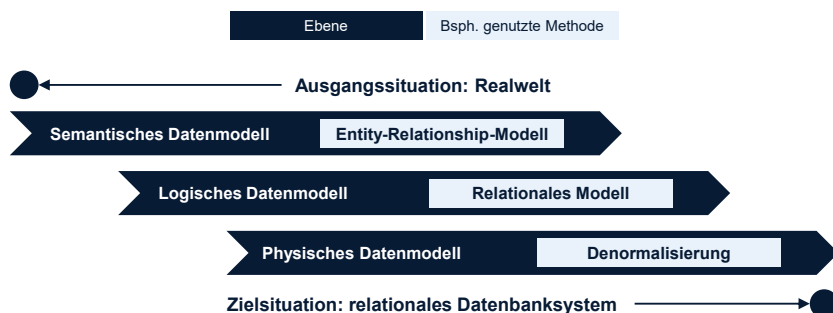


Abbildung 25: Ebenen für die Entwicklung eines relationalen Datenbanksystems²⁸⁴

2.3.2.5 Data Lake und Data Warehouse

In Unternehmen gibt es wie in Kapitel 2.2.4 erläutert unzählige verschiedene Datenbanksoftwaredistributionen und IT-Systeme. Um diese verschiedenen Datenquellen für Analysezwecke zu organisieren und zu konsolidieren, wurden unterschiedliche Methoden entwickelt. Vielfach eingesetzt sind sogenannte Daten-Seen (engl. Data Lakes) und Daten-Warenhäuser (engl. Data Warehouses). In Data Warehouses werden strukturierte und bereinigte Daten gespeichert, welche von großer Relevanz für das Unternehmen sind. Hierfür sind eine zuverlässige Datenaufbereitung und ein effizientes Datenmodell notwendig, da oft viele Nutzende diese Daten abfragen. Aufgrund der aufwendigen Datenverarbeitung werden nur relevante

²⁸¹ Vgl. Kemper; Eickler (Datenbanksysteme), 2015, S. 23-24.; Vgl. Kemper; Eickler (Datenbanksysteme), 2015, S. 33.; Vgl. Hahne (Logische Modellierung mehrdimensionaler Datenbanksysteme), 2002, S. 9.

²⁸² Vgl. Abts; Mülder (Grundkurs Wirtschaftsinformatik), 2017, S. 175.

²⁸³ Vgl. Gölzer (Big Data in Industrie 4.0), 2017b.

²⁸⁴ i.A.a. Kelzenberg (Datenstrukturmodell für den digitalen Schatten), 2020, S. 69.

Daten in Data Warehouses gespeichert. In Data Lakes werde alle Rohdaten aus den verschiedenen Datenquellen unstrukturiert und nicht bereinigt gelagert. Die Datenspeicherung ist entsprechend wenig komplex und kostengünstig. Wenn ein Data Scientist/Analyst nun Daten analysieren möchte, welche nicht im Data Warehouse verfügbar sind, extrahiert er diese aus dem Data Lake und bereitet dieses Subdatenset auf. Die Datenaufbereitung ist nachgeschaltet.²⁸⁵ In der nachfolgenden Abbildung 26 sind die Unterschiede in der Nutzung dargestellt.

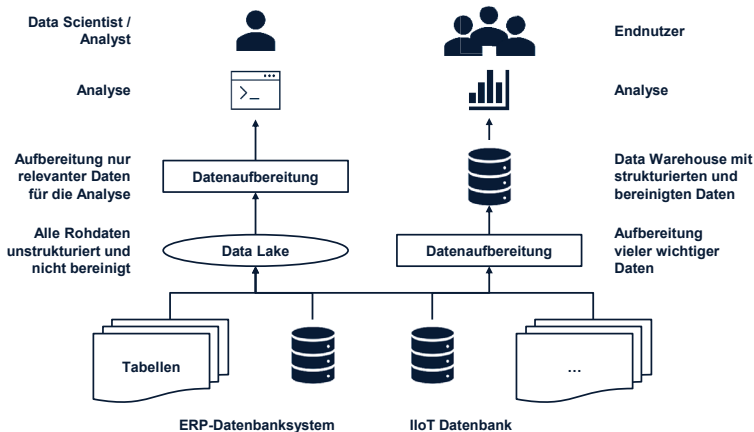


Abbildung 26: Unterschiede in der Nutzung von Data Warehouse und Data Lake²⁸⁶

²⁸⁵ Vgl. Fasel; Meier (Big Data), 2016, S. 308.

²⁸⁶ i.A.a. Fasel; Meier (Big Data), 2016, S. 308.

Abschließend sind die Unterschiede der beiden vorgestellten Speicherlösungen in der nachfolgenden Abbildung 27 dargestellt.²⁸⁷

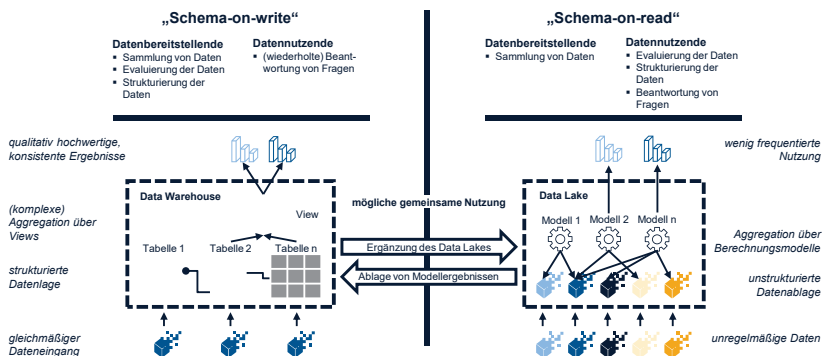


Abbildung 27: Abgrenzung Data-Lake und Data-Warehouse²⁸⁸

2.3.3 Methoden der Datenanalyse und -verarbeitung

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Grundlagen des Datenmanagements erläutert worden sind, werden in diesem Kapitel ausgewählte Methoden und Zielsetzungen der Datenanalyse und -verarbeitung präsentiert.

Analysemethoden können in die zwei Kategorien Statistik und Machine Learning unterteilt werden. Unter statistische Methoden fallen z. B. einfache Durchschnittsrechnungen, Korrelationsanalysen oder auch lineare Regressionsanalysen. Zudem fällt der statistische Signifikanztest aus dem Fachgebiet der induktiven Statistik in diese Kategorie.²⁸⁹ Die zweite Kategorie Machine Learning kann unterteilt werden in Supervised und Unsupervised Learning Algorithmen. Die beiden Konzepte unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zielsetzung. Während Supervised Learning Algorithmen die Zielsetzung verfolgen, das korrekte Ergebnis möglichst präzise vorherzusagen, zielen Unsupervised Learning Algorithmen darauf ab, bisher verdeckte Strukturen in den Daten zu erkennen oder diese zu segmentieren.²⁹⁰ Im Kontext des überwachten Lernens sind insbesondere Klassifikations- und Regressionsalgorithmen von Relevanz. Klassifikationsalgorithmen haben zum Ziel, die Zugehörigkeitskategorie eines Outputs vorherzusagen. Im Gegensatz dazu prognostizieren Regressionsalgorithmen den Wert einer kontinuierlichen Variable. Zu den prominenten Klassifikationsalgorithmen für das Supervised Learning zählen beispielsweise:²⁹¹

- Random Forest Classifier

²⁸⁷ Vgl. Benning; Wenger (Smart-Data-Management), 2022, S. 185.; Vgl. Müller (Erweiterung des Data Warehouse um Hadoop, NoSQL & Co), 2016, S. 139-157.

²⁸⁸ Vgl. Benning; Wenger (Smart-Data-Management), 2022, S. 185.; Vgl. Fang (Managing data lakes in big data era), 2015, S. 820-824.

²⁸⁹ Vgl. Bracht et al. (Digitale Fabrik), 2018a, S. 110-112.

²⁹⁰ Vgl. Niebler; Lindner (Datenbasiert entscheiden), 2022, S. 11.

²⁹¹ Vgl. El Morr; Ali-Hassan (Descriptive, Predictive, and Prescriptive Analytics), 2019, S. 35-36.

- Support Vektor Regression
- K nearest Neighbours
- Logistische Regression
- Künstliche neuronale Netze

Zu den bekanntesten Regressionsalgorithmen für das Supervised Learning zählen unter anderem:²⁹²

- Lineare Regression
- Decison Trees
- Random Forest Regression
- Support Vektor Regression
- Neuronale Netze

Beim Unsupervised Learning werden hingegen Algorithmen der Clusteranalyse und der Dimensionsreduktion verwendet. Die Clusteranalyse hat das Ziel, versteckte Muster oder Gruppierungen in den Daten zu detektieren. Die Dimensionsreduktion hat den Zweck, die Anzahl der erklärenden Variablen in einem Modell zu minimieren, wodurch eine effizientere Datenvisualisierung und reduzierte Verarbeitungszeiten ermöglicht werden. Der K-means Clustering-Algorithmus stellt eine weitverbreitete Methode in der Clusteranalyse dar, während die Principal-Component-Analysis (PCA) im Kontext der Dimensionsreduktion Anwendung findet.²⁹³

Die Analysezielsetzungen lassen sich in die vier Bereiche deskriptiv, diagnostisch, prädiktiv und präskriptiv aufteilen, welche sich hinsichtlich ihrer Komplexität und ihrem spezifischen Anwendungsnutzen unterscheiden. Mit steigender Komplexität der Analysemethoden intensiviert sich gleichzeitig das Ausmaß an Unsicherheit.²⁹⁴

Deskriptive Analytics ist dabei wahrscheinlich die meistverbreitete Art der Analyse. Ihr Fokus liegt auf der Retrospektive von Ereignissen, wobei das primäre Ziel die Identifikation von Gründen der vergangenen Erfolge und Misserfolge ist. Hierbei wird die historische Datenbasis systematisch aufbereitet und dargestellt, sodass sie einfach von Menschen verstanden und interpretiert werden kann. Ein Hauptaugenmerk liegt auf der Quantifizierung von Zusammenhängen zwischen den erklärenden und abhängigen Variablen. Zusammenfassend ist die deskriptive Analyse eine Beschreibung der Vergangenheit.²⁹⁵

Diagnostic Analytics geht einen Schritt weiter und adressiert insbesondere die Fragestellung des „Warum?“. Hierbei liegt der Fokus darauf, die Gründe für diverse Ereignisse zu bestimmen, wofür Methoden wie Data Discovery, Data Mining, Detailanalyse oder die Korrelations-

²⁹² Vgl. El Morr; Ali-Hassan (Descriptive, Predictive, and Prescriptive Analytics), 2019, S. 35-36.

²⁹³ Vgl. El Morr; Ali-Hassan (Descriptive, Predictive, and Prescriptive Analytics), 2019, S. 36-37.

²⁹⁴ Vgl. Raja et al. (Market Behavior Analysis using Descriptive Approach), 2019, S. 171-173.; Vgl. Akerkar (Introduction to Artificial Intelligence), 2019, S. 6-8.; Vgl. Gölzer (Big Data in Industrie 4.0), 2017a, S. 59.; Vgl. Soltanpoor; Sellis (Prescriptive Analytics for Big Data), 2016, S. 245-256.

²⁹⁵ Vgl. Balali et al. (Data Analytics), 2020, S. 107-109.; Vgl. Akerkar (Employing AI in Business), 2019, S. 64-66.; Vgl. Olson; Wu (Knowledge Management), 2017, S. 5-6.

analyse verwendet werden. Die Zielsetzung der diagnostischen Analyse liegt im Erlangen tiefergehender Einblicke in die Gründe für verschiedene Ereignisse und kann hilfreich für zukünftige Entscheidungen sein.²⁹⁶

Während die deskriptive und diagnostische Analyse auf die Vergangenheit und Gegenwart gerichtet sind, orientiert sich Predictive Analytics vorrangig an der Zukunft und generiert Prognosen über zukünftige Entwicklungen. Beispielsweise wird die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ereignis in der Zukunft auftritt, die Zeit, zu der es auftritt, oder die quantitative Höhe einer unbekannten Variabel prognostiziert. Für diese Prognosen über die Zukunft werden Daten aus der Vergangenheit und der Gegenwart verwendet, wobei die Nutzung von prädikativen Modellen immer mit Unsicherheit verbunden ist. Jedoch sind diese so robust, dass der Entscheidungsfindungsprozess substanziell optimiert wird. Ziel ist es, unverarbeitete Daten in wertvolle und umsetzbare Informationen umzuwandeln. Dabei bedient sich die prädiktive Analyse verschiedener statistischer Tools wie beispielsweise Data Mining oder Machine Learning. Zusammenfassend bezieht sich die präskriptive Analyse auf das Erlangen von genauen und umsetzbaren Informationen basierend auf erfassten Daten hinsichtlich der Zukunft.²⁹⁷

Prescriptive Analytics erweitert das Spektrum der prädiktiven Analyse, indem nicht nur prognostiziert wird, was und wann etwas geschehen könnte, sondern auch warum. Die präskriptive Analyse kombiniert Big Data, verschiedene wissenschaftliche Prinzipien, Geschäftsregeln und IoT-Disziplinen, um diese für die Vorhersagen zu nutzen und die bestmöglichen Entscheidungen abzuleiten. Dazu werden Empfehlungen zu jedem möglichen Ausgang der Vorhersagen abgegeben.

2.3.4 Vorgehensmodelle

Nach der Vorstellung der unterschiedlichen Methoden zur Datenanalyse werden in diesem Kapitel abschließend Vorgehensmodelle im Themengebiet der Datenanalyse aus verschiedenen Perspektiven vorgestellt. Zunächst wird der Datenlebenszyklus erläutert. Im zweiten Schritt folgt die Vorstellung von drei Vorgehensmodellen für die Durchführung von Data Analytics Projekten.

2.3.4.1 Datenlebenszyklus

Im Kontext der Datennutzung ist das Verständnis des Datenlebenszyklus (engl. Data Life Cycle) von zentraler Bedeutung. Der Datenlebenszyklus kann in neun distinktive Phasen unterteilt werden, die nachfolgend vorgestellt werden. Zunächst steht die Datengenerierung im Vordergrund, bei der Daten durch verschiedene Aktivitäten wie Online-Suchen, Sensorüberwachung oder Benutzerinteraktionen erzeugt werden. Diese generierten Daten können sowohl strukturiert als auch unstrukturiert sein. Anschließend tritt die Phase der Datenerfassung in den Fokus, während derer die erzeugten Daten gesammelt werden, wenngleich aufgrund

²⁹⁶ Vgl. Balali et al. (Data Analytics), 2020, S. 109-110.; Vgl. Siow et al. (Analytics for the Internet of Things), 2019, S. 11-13.

²⁹⁷ Vgl. Balali et al. (Data Analytics), 2020, S. 110-111.; Vgl. Akerkar (Employing AI in Business), 2019, S. 66-69.; Vgl. Grover; Kar (Big Data Analytics: A Review on Theoretical Contributions and Tools Used in Literature), 2017, S. 203-210.

praktischer Beschränkungen oder absichtlicher Filterung nicht alle Daten erfasst werden. Die Erfassungsmethoden variieren je nach Datenquelle und können bestimmten Einschränkungen unterliegen. Darauf folgt die Datenverarbeitung, in der die gesammelten Daten bereinigt, formatiert, komprimiert und verschlüsselt werden. In diesem Schritt werden die Daten für eine effiziente und sichere Speicherung sowie für die anschließende Analyse vorbereitet. Darauf folgt im vierten Schritt die Speicherung der verarbeiteten Daten.²⁹⁸

Anschließend werden die Daten in der Phase der Datenverwaltung organisiert und verwaltet, um optimierte Zugriffsmuster zu gewährleisten. Als sechster Schritt folgt die Datenanalyse, welche die Anwendung rechengestützter und statistischer Techniken wie maschinelles Lernen umfasst. Damit wird das Ziel verfolgt, Erkenntnisse zu gewinnen, Modelle zu erstellen, Vorhersagen zu treffen oder Kausalitäten aus den Daten abzuleiten. Die folgende Datenvisualisierung spielt eine entscheidende Rolle, indem sie durch den Einsatz von Diagrammen, Grafiken und anderer visueller Mittel Muster und Trends in den Daten hervorhebt und so eine intuitive menschliche Interpretation ermöglicht.²⁹⁹

Auf die Analyse und Visualisierung der Daten folgt die Interpretation. Der Wert der Daten steigt durch die im Rahmen der Interpretation erfolgten Kontextualisierung und Auswertung. Die abschließende Phase beschreibt die menschliche Nutzung der interpretierten Daten. Fachleute aus verschiedenen Bereichen nutzen die gewonnenen Erkenntnisse, um auf dieser Basis Entscheidungen zu treffen, Diagnosen zu stellen oder Verbesserungen in ihren jeweiligen Bereichen vorzunehmen. Der Data Life Cycle ist zyklisch, sodass nach dessen Abschluss neue Fragestellungen entstehen, die eine erneute Durchführung des Lebenszyklus auslösen. Es besteht während des gesamten Lebenszyklus die essenzielle Wichtigkeit, verantwortungsvoll mit den Daten umzugehen und im Zuge des Datenschutzes interdisziplinäre und ethische Standards einzuhalten.³⁰⁰

2.3.4.2 Datenbasierte Prozessoptimierung

UNGERMANN ET AL. haben eine Methodik entwickelt, die den Entwicklungsprozess von Data-Analytics-Projekten zur Prozessoptimierung in der Produktionsumgebung beschreibt und speziell an die Anforderungen kleiner und mittelständischer Unternehmen ausgerichtet ist.³⁰¹ Die Methodik verfügt über fünf Schritte, die nachfolgend vorgestellt werden. Im ersten Schritt wird die Prozesslandschaft erfasst und zu erreichende Sollwerte festgelegt. Die Sollwerte werden mittels Leistungskennzahlen (engl. Key Performance Indicators, KPIs) erfasst. Im darauffolgenden Schritt werden relevante Daten identifiziert und überprüft, ob und wie diese schon aufgenommen werden. Falls Daten fehlen oder die Qualität nicht ausreicht, kann abgewogen werden, diese noch zu erfassen bzw. verbessert zu erfassen. Im dritten Schritt werden die Daten verarbeitet und analysiert. Anschließend werden im vierten und fünften Schritt auf Basis dieser

²⁹⁸ Vgl. Rahul; Banyal (Data Life Cycle Management in Big Data Analytics), 2020, S. 364-370.; Vgl. Wing (The Data Life Cycle), 2019, S. 2-4.

²⁹⁹ Vgl. Raja et al. (Market Behavior Analysis using Descriptive Approach), 2019, S. 171-173.

³⁰⁰ Vgl. Rahul; Banyal (Data Life Cycle Management in Big Data Analytics), 2020, S. 364-370.; Vgl. Wing (The Data Life Cycle), 2019, S. 2-4.

³⁰¹ Vgl. Ungermann et al. (Data Analytics for Manufacturing Systems), 2019, S. 369.

Datenanalyse KPIs ausdetailliert, sowie Verbesserungsmaßnahmen identifiziert und bewertet.³⁰² Die fünf vorgestellten Schritte sind in der nachfolgenden Abbildung 28 dargestellt.



Abbildung 28: Datenbasierte Prozessoptimierung³⁰³

2.3.4.3 CRISP-DM - Standardprozess für Data Mining

SHAERER hat im Jahre 2000 den branchenübergreifenden Standardprozess für Data Mining (engl. Cross Industry Standard Process for Data Mining, CRISP-DM) veröffentlicht, der in Zusammenarbeit mit Integral Solutions Ltd, Teradata, Daimler AG, NCR Corporation und OHRA seit 1996 entwickelt wurde.³⁰⁴ Er gilt als der Standard in der Entwicklung von Data-Science-Projekten.³⁰⁵ Viele Weiterentwicklungen basieren auf diesem Modell.³⁰⁶ Der Prozess besteht wie in Abbildung 29 dargestellt aus sechs Stufen. Zuerst wird das Betriebsverständnis aufgebaut. Hier gilt es die Geschäftsziele zu bestimmen und die aktuelle Situation zu bewerten. Darauf aufbauend werden dann die Analytikzielsetzungen festgelegt und ein Projektplan erstellt. Es folgt die Entwicklung des Datenverständnisses. Es werden Daten gesammelt, beschrieben, untersucht und auf ihre Qualität geprüft. Schließlich werden die Daten für die Modellierung vorbereitet. Hierbei müssen die richtigen Daten ausgewählt, bereinigt, integriert und formatiert werden. In der Modellierung wird zuerst die Modellierungstechnik ausgewählt, das Modell parametrisiert, anschließend trainiert und bewertet. Nach der initialen technischen Bewertung muss im Evaluierungsschritt das Modell, basierend auf den identifizierten Geschäftszielen, breiter getestet werden. Anschließend wird der bisherige Fortschritt im Ganzen betrachtet und darauf aufbauend die nächsten Schritte bestimmt. Zuletzt folgt das Deployment, in dem

³⁰² Vgl. Ungermann et al. (Data Analytics for Manufacturing Systems), 2019, S. 371-373.

³⁰³ Vgl. Ungermann et al. (Data Analytics for Manufacturing Systems), 2019, S. 371.

³⁰⁴ Vgl. Shearer (The CRISP-DM model), 2000, S. 13.

³⁰⁵ Vgl. Martinez-Plumed et al. (CRISP-DM Twenty Years Later), 2020, S. 1.

³⁰⁶ Vgl. Martinez-Plumed et al. (CRISP-DM Twenty Years Later), 2020, S. 4.

die Implementierung sowie die Überwachung und Wartung des Produktsystems geplant werden. Zudem wird abschließend ein Abschlussbericht und eine interne Beurteilung des Projekts verfasst.³⁰⁷

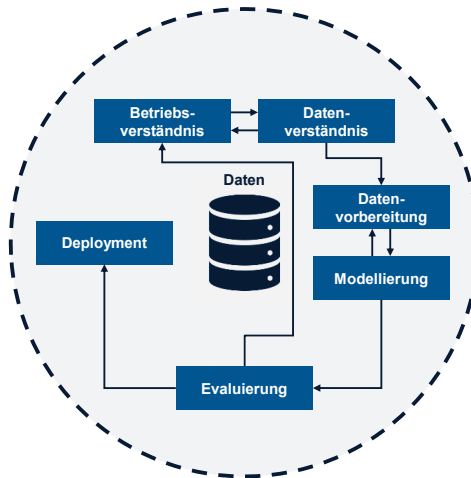


Abbildung 29: CRISP-DM Modell Aufbau³⁰⁸

2.3.4.4 Smart-Data-Management

Das Vorgehensmodell Smart-Data-Management (SDM) wurde in Anlehnung an das Data-Science-Vorgehen der IBM Foundational Methodology for Data Science³⁰⁹ entwickelt. Bei den Phasen der Datenerfassung und Vorbereitung basiert das Modell zudem auch auf anderen etablierten Data-Mining Modellen wie beispielsweise dem Knowledge Discovery in Databases (KDD)³¹⁰ oder dem CRISP-DM³¹¹. Beim SDM-Modell steht im Gegensatz zu den referenzierten Modellen der Kunde im Zentrum der Betrachtung. Dadurch wird unterstrichen, dass sich Smart Data als Informationsressource insbesondere durch den Geschäftswert von bloßen Rohdaten differenziert. Mit Hilfe von Anwendungen der datenbasierten Wertschöpfung in Unternehmen soll der Wunsch nach datengetriebenen Entscheidungen und Kundenzufriedenheit geschaffen werden.³¹² Das SDM-Modell untergliedert sich in drei Phasen. Phase 1 beschreibt die Anforderungssynthese. Auf Basis des Kundenverständnisses wird die benötigte Datengrundlage identifiziert. Darauf folgt Phase 2 mit der Lösungsentwicklung. Bestandteile dieser Phase sind die Make-or-Buy-Entscheidung, die iterative Erarbeitung der Lösung sowie die kosteneffiziente Umsetzung von Buy-Projekten. Abschließend folgt Phase 3, die die Evaluation und Umsetzung

³⁰⁷ Vgl. Shearer (The CRISP-DM model), 2000, S. 14.

³⁰⁸ Vgl. Shearer (The CRISP-DM model), 2000, S. 14.

³⁰⁹ Vgl. Rollins (Foundational Methodology for Data Science), 2015.

³¹⁰ Vgl. Fayyad et al. (From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases), 1996.

³¹¹ Vgl. Shearer (The CRISP-DM Model: The New Blueprint for Data Mining), 2000.

³¹² Vgl. Benning; Wenger (Smart-Data-Management), 2022, S. 190-191.; Vgl. Akerkar (Introduction to Artificial Intelligence), 2019, S. 6.

umfasst. Für weitere Ausführungen zu diesem Modell wird auf die Literatur verwiesen.³¹³ In der nachfolgenden Abbildung 30 ist das SDM-Modell dargestellt.

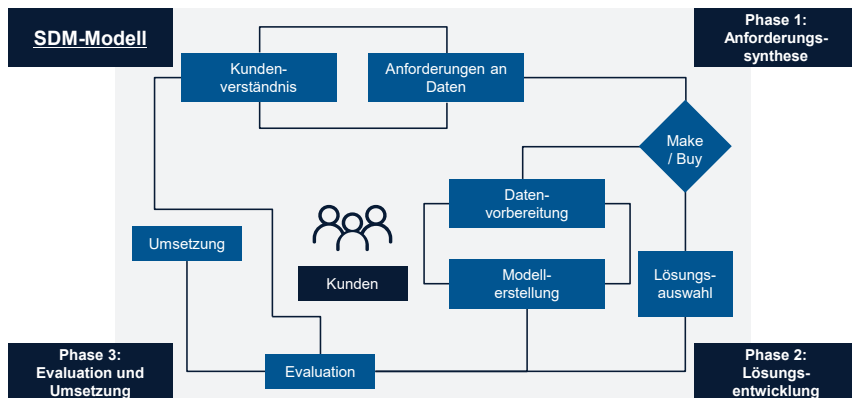


Abbildung 30: SDM-Modell für Smart-Data-Management³¹⁴

2.4 Handlungsbedarf aus der Praxis

Wie in den Kapiteln 1.1 und 1.2 beschrieben stehen produzierende Unternehmen am Wirtschaftsstandort Deutschland angesichts der dargestellten Ausgangssituation vor der Herausforderung, innovative Produkte kosteneffizienter produzieren zu müssen. Als Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Serienfertigung ist der Werkzeugbau ein zentraler Befähiger einer leistungsfähigen produzierenden Industrie.³¹⁵ Als solcher sieht er sich mit der notwendigen Überwindung der drei zentralen Herausforderungen einer zunehmenden Produktderivatisierung, einer Verkürzung von Produktlebenszyklen sowie günstigeren Faktorkosten globaler Wettbewerber konfrontiert.³¹⁶ Angesichts des resultierenden, wachsenden Kostendrucks stellt eine bloße Preissenkung für hochwertige Werkzeuge aus europäischen Werkzeugbaubetrieben keine nachhaltige Lösung dar. Durch eine umfassende Analyse und gezielte Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten über alle Phasen hinweg kann jedoch eine klare Differenzierung erzielt werden. Dazu ist es wie in den Kapitel 2.1.6 und 2.1.7 beschrieben notwendig, Transparenz über die Werkzeugkosten sowie die werkzeuglebenszykluskostenbeeinflussenden Faktoren entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus zu erhalten. In der Vergangenheit fanden Werkzeuglebenszyklusbetrachtungen wenig Anwendung, da die Lebenszykluskosten und -daten nicht erhoben oder nicht jedem einzelnen Werkzeug bzw. jeder einzelnen Komponente verursachungsgerecht zugeordnet werden konnten.³¹⁷

³¹³ Vgl. Benning; Wenger (Smart-Data-Management), 2022, S. 191-204.

³¹⁴ i.A.a. Benning; Wenger (Smart-Data-Management), 2022, S. 191.

³¹⁵ Vgl. Holmes et al. (Innovation in the automotive tool, die and mould industry), 2005, S. 125-129.; Vgl. Klocke et al. (Zukunftsstudie Werkzeug- und Formenbau), 2005, S. 15.

³¹⁶ Vgl. Schuh et al. (Der Werkzeugbau im Wandel), 2012, S. 72-74.

³¹⁷ Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 16-17.

Das dargestellte Praxisdefizit kann durch ein in den Jahren 2023 und 2024 durchgeführtes Konsortialbenchmarking (KBM) zum Thema Effiziente Werkzeuginstandhaltung – Kosten- oder Wettbewerbsfaktor bestätigt werden.³¹⁸ An dem vom Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen durchgeführten Konsortialbenchmarking nahmen bis zum Auswertungszeitpunkt insgesamt 27 Werkzeugbaubetriebe teil. 13 der 27 Unternehmen stellen kunststoffverarbeitende Werkzeuge her, 17 der 27 Unternehmen stellen metallverarbeitende Werkzeuge her. Drei der 27 Unternehmen stellen entsprechend kunststoff- und metallverarbeitende Werkzeuge her. Die 27 Unternehmen befinden sich allesamt in der Region Deutschland, Österreich und Schweiz. Im Betrachtungsfokus des Konsortialbenchmarkings liegt insbesondere die Phase der Werkzeuginstandhaltung während der Serienproduktion sowie partiell auch die Phase der Werkzeugbeschaffung. Für die Auswertung des Konsortialbenchmarkings werden drei Vergleichsgruppen gebildet. In der Vergleichsgruppe Kunststoff sind die 13 Unternehmen, die kunststoffverarbeitende Werkzeuge herstellen und instand halten. In der Vergleichsgruppe Metall entsprechend die 17 Unternehmen, die metallverarbeitende Werkzeuge herstellen und instand halten. In der Vergleichsgruppe Durchschnitt sind sowohl die 27 Unternehmen, die am Konsortialbenchmarking teilgenommen haben, als auch weitere Datensätze aus dem Wettbewerb Excellence in Production (EiP)³¹⁹, falls die betreffende Kennzahl in einem der EiP Wettbewerbe erfasst worden ist. Für ein besseres Verständnis der Datengrundlage werden zunächst die Anzahl der Mitarbeitenden im Werkzeugbau sowie der Werkzeuginstandhaltung genannt. Im Durchschnitt sind im Werkzeugbau 60 Mitarbeitende beschäftigt, wohingegen der Wert in der Vergleichsgruppe Kunststoff bei 64 und in der Vergleichsgruppe Metall bei 80 Mitarbeitenden liegt. In der Werkzeuginstandhaltung sind durchschnittlich 35 Mitarbeitende beschäftigt. In der Vergleichsgruppe Kunststoff liegt der Wert bei 22,8 und in der Vergleichsgruppe Metall bei 45,2. Die beiden Kennzahlen Mitarbeitende im Werkzeug und Mitarbeitende in der Werkzeuginstandhaltung sind im Anhang in Abbildung 164 und Abbildung 165 abgebildet.

Die erste Auffälligkeit im Konsortialbenchmarking Effiziente Werkzeuginstandhaltung ist, dass der Großteil der Unternehmen nicht über eine Instandhaltungsstrategie verfügt. Dies ist ein Indikator dafür, dass die werkzeublebenszyklusübergreifende Betrachtung von Werkzeugen bisher eher die Ausnahme als die Regel ist. Die Werkzeuginstandhaltung wird entsprechend als Kostenfaktor und nicht als Wettbewerbsfaktor verstanden. Diese Aussage wird unterstützt durch den sehr geringen Bekanntheitsgrad der Werkzeuginstandhaltungsstrategien in den Unternehmen. Die beiden genannten Kennzahlen sind in Abbildung 31 abgebildet.

³¹⁸ Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

³¹⁹ Vgl. Excellence in Production (Rückblick EiP-Wettbewerb).

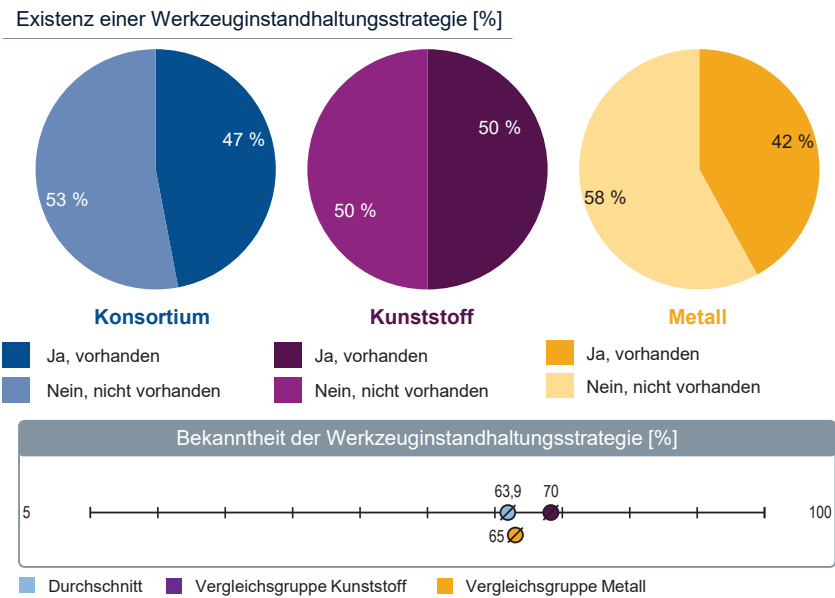
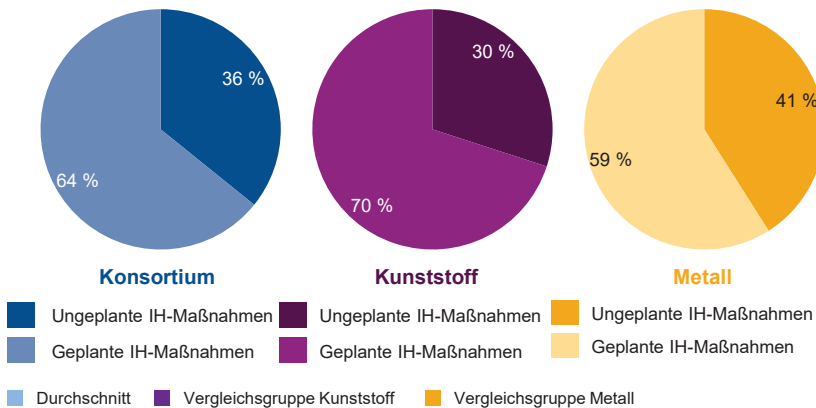


Abbildung 31: KBM – Existenz und Bekanntheit der Werkzeuginstandhaltungsstrategie³²⁰

Ein weiterer Indikator ist die Verteilung der Instandhaltungsmaßnahmen auf geplante und ungeplante Instandhaltungen. Der grundsätzlich hohe Anteil 64 % ungeplanter Instandhaltungen im Durchschnitt belegt, dass die Instandhaltung überwiegend reaktiv erfolgt und nicht präventiv, zustandsorientiert oder vorausschauend. Da insbesondere werkzeugbedingte Produktionsstillstände zu sehr hohen Kosten führen, besteht hier insbesondere in der Vergleichsgruppe Metall Handlungsbedarf. In der nachfolgenden Abbildung 32 ist die Verteilung der Instandhaltungsmaßnahmen dargestellt.

³²⁰ Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

Verteilung der Werkzeuginstandhaltungsmaßnahmen [%]

**Abbildung 32: KBM – Verteilung der Werkzeuginstandhaltungsmaßnahmen³²¹**

Eine weitere Auffälligkeit ist die Abweichung der angefallenen zu den geplanten Instandhaltungskosten für metall- und kunststoffverarbeitende Werkzeuge. Im Benchmarking wurden dazu drei Werkzeugkategorien betrachtet: Werkzeuge mit hohem, mit mittlerem sowie mit geringem Instandhaltungsaufwand. Es ist ersichtlich, dass die größte Abweichung von angefallenem zu geplantem Instandhaltungsaufwand bei den Werkzeugen mit großem Instandhaltungsaufwand auftritt. Die größte Abweichung nach oben findet sich bei den metallverarbeitenden Werkzeugen mit 155 %. Positive Abweichungen nach unten finden sich bei den kunststoffverarbeitenden Werkzeugen mit geringem Instandhaltungsaufwand. Beide Kennzahlen belegen, dass die tatsächlich angefallenen Instandhaltungskosten sowohl deutlich unter sowie deutlich über den ursprünglich geplanten Instandhaltungskosten liegen können. Beide Abweichungen sind ein weiterer Beleg für ein stark erfahrungs- und wenig datenbasiertes Instandhaltungsmanagement. Die Kostenabweichung für die metallverarbeitenden und für die kunststoffverarbeitenden Werkzeuge kann im Detail im Anhang in Abbildung 167 und Abbildung 168 nachvollzogen werden.

Gründe für die Kostenabweichungen sind wie in Abbildung 33 dargestellt fehlerhafte auf Erfahrungswissen basierende Abschätzungen, eine geringe Prozessstabilität sowie ein nicht produktionsgerechtes Werkzeugkonzept. Die Kennzahlen belegen, dass die Aufnahme, Auswertung und Nutzung von datenbasiertem Wissen über alle Vergleichsgruppen hinweg noch stark ausbaufähig ist. Sowohl die Abschätzung der Kosten, die Stabilisierung der Prozesse

³²¹ Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

als auch die Wahl eines produktionsgerechten Werkzeugkonzepts können mithilfe datenbasierter Transparenz systematisch gesteigert werden.

Gründe für Kostenabweichungen [%]

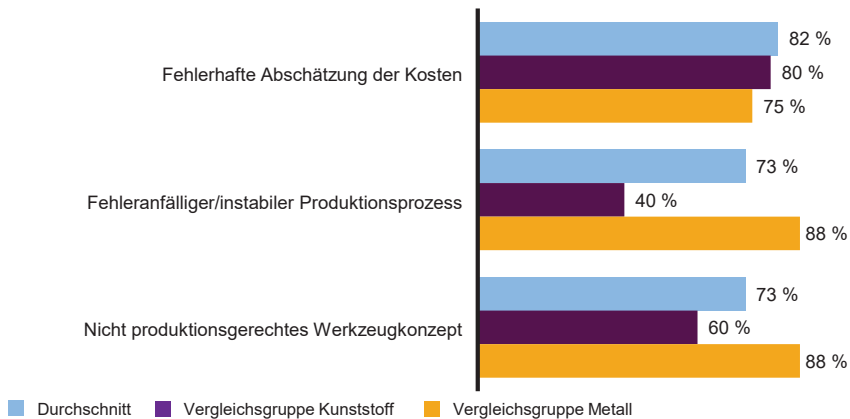
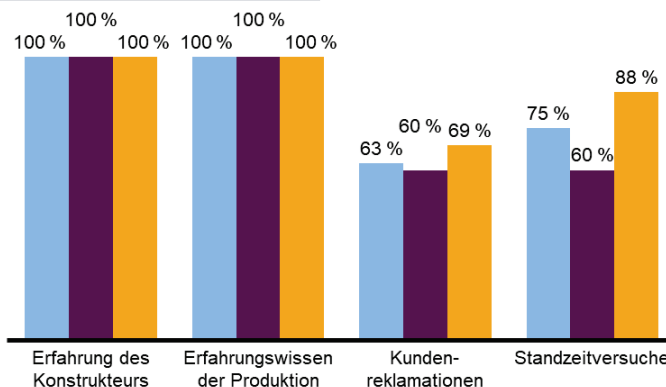


Abbildung 33: KBM – Gründe Kostenabweichung³²²

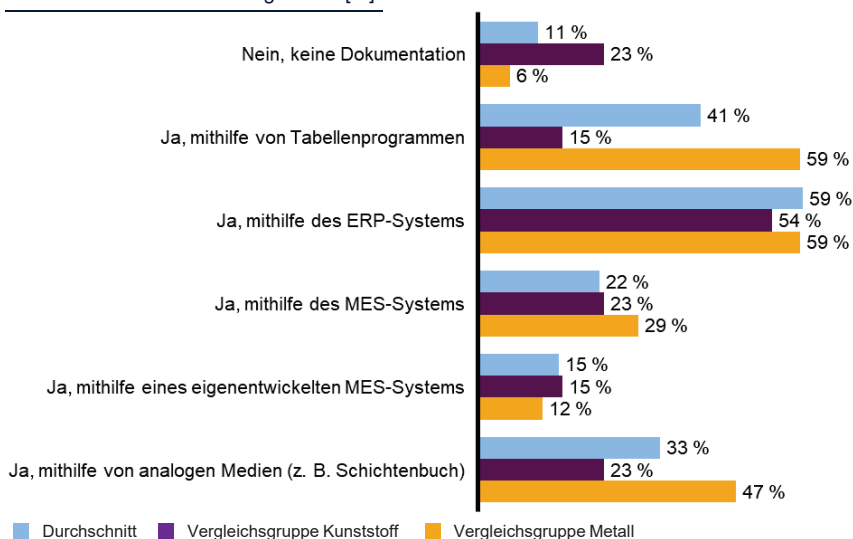
Die starke Fokussierung auf Erfahrungswerte spiegelt sich in zwei weiteren Kennzahlen wider, die in Abbildung 34 dargestellt sind. Zum einen erfolgt die Identifikation versagenskritischer Teile in der Vergleichsgruppe Metall nur in 88 % der Fälle auf Basis durchgeführter Standzeitversuche, jedoch in 100 % auf Basis von Erfahrungswissen. Zum anderen erfolgt die Dokumentation von Ausfallgründen in vielen Fällen noch mit Hilfe analoger Medien oder Tabellenprogrammen. Eine automatisierte und standardisierte Weiterverarbeitung der Daten wird aufgrund der Ablage der Daten in verschiedenen Dateien im Gegensatz zur Ablage der Daten in einer strukturierten Datenbank stark erschwert.

³²² Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

Identifikation versagenskritischer Teile [%]



Dokumentation von Ausfallgründen [%]

Abbildung 34: KBM – Identifikation kritischer Teile & Dokumentation von Ausfallgründen³²³

Auch die Festlegung von Ersatzteilmengen erfolgt überwiegend erfahrungsbasiert oder auf Basis von Expertenschätzungen. In der Vergleichsgruppe Metall wird lediglich in 29 % der Fälle eine Standzeit-/Standmengenauswertung für die Festlegung der Ersatzteilmengen genutzt. Eine Nachbesprechung der Ersatzteilmengen findet bezogen auf den Durchschnitt in nur 18 % der Fälle statt. Bezogen auf die Vergleichsgruppe Metall findet die Nachbesprechung

³²³ Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

in 29 % der Fälle statt. Die Kennzahlen zur eingesetzten Methode für die Festlegung der Ersatzteilmenge sowie die Verteilung einer Nachbesprechung zur definierten Ersatzteilmenge sind in der nachfolgenden Abbildung 35 dargestellt.

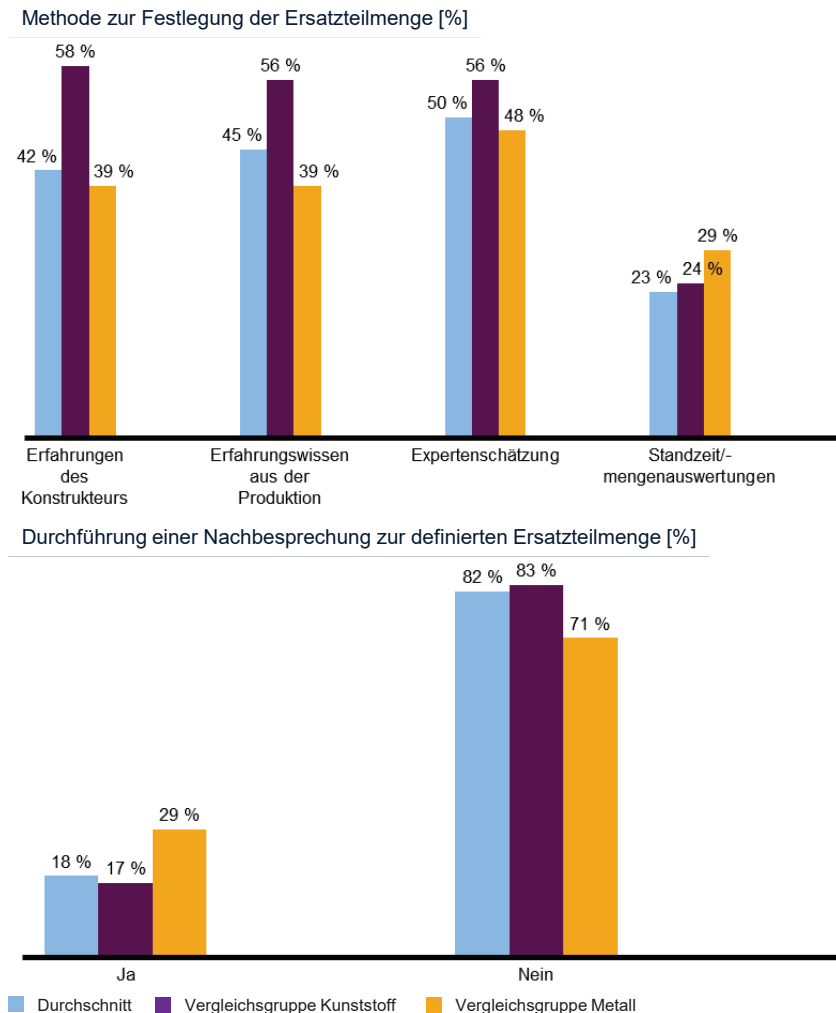


Abbildung 35: KBM – Festlegung & Nachbesprechung Ersatzteilmengen³²⁴

Die Hypothese, dass die Aufnahme, Auswertung und Nutzung von datenbasiertem Wissen über alle Vergleichsgruppen hinweg noch stark ausbaufähig ist, kann durch verschiedene

³²⁴ Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

Kennzahlen gestützt werden. Zunächst erfolgt die Datenerfassung in den meisten Fällen nur auf der übergeordneten Ebene des Komplettwerkzeugs und nicht auf der Ebene von Werkzeugbaugruppen oder sogar auf der Ebene von Werkzeugkomponenten. Die Kennzahl ist in Abbildung 36 abgebildet. Zudem erfolgt die Datenerfassung in 69 % der Fälle auf der Werkzeugtypebene und nicht auf Instanzebene. Die dazugehörige Kennzahl ist in Abbildung 166 im Anhang dargestellt. Die hohe Ebene und der fehlende Detaillierungsgrad der Datenerfassung erschweren eine verursachungsgerechte Zuordnung und Auswertung der Daten.

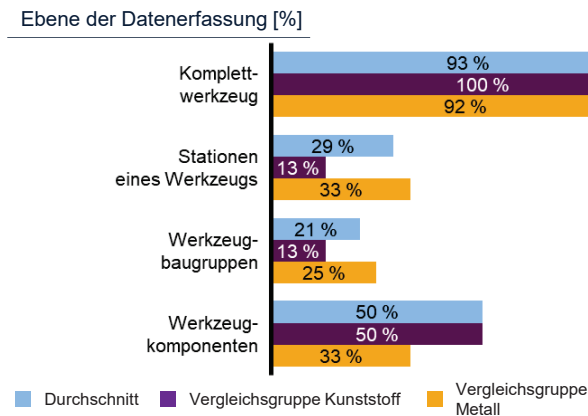


Abbildung 36: KBM – Ebene der Datenerfassung³²⁵

Auf die Erfassung der Daten folgt die systematische Auswertung der Daten. Aus Abbildung 169 im Anhang wird ersichtlich, dass die Zuständigkeit der Datenauswertung häufig nicht geklärt ist oder bei Mitarbeitenden liegt, die über wenig oder kein detailliertes Wissen im Bereich Datenanalyse und -auswertung verfügen. Die Aussage wird gestützt durch die in Abbildung 37 dargestellte Kennzahl Werkzeuge zur Datenauswertung & Datenbasierte Use Cases. Das Microsoft Tool Excel wird von der Vergleichsgruppe in 76 % der Fälle für die Datenauswertung genutzt. Durch die Wahl nur beschränkt anforderungsgerechter Tools wird der mögliche Nutzen der datenbasierten Werkzeugdaten- und Kostenanalyse stark eingeschränkt. Entsprechend ist die Nutzung der Erkenntnisse aus der Datenauswertung für datenbasierte Use Cases noch ausbaufähig. Während die datenbasierte Optimierung des Werkzeugkonzepts bereits von mindestens 75 % der Unternehmen angewendet wird, ist der Prozentsatz bei den datenbasierten Use Cases anforderungsgerechtes Instandhaltungskonzept und intelligentes Ersatzteilmanagement bereits deutlich geringer. Im Bereich Datenanalyse und -nutzung besteht ein großes Entwicklungspotenzial.

³²⁵ Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

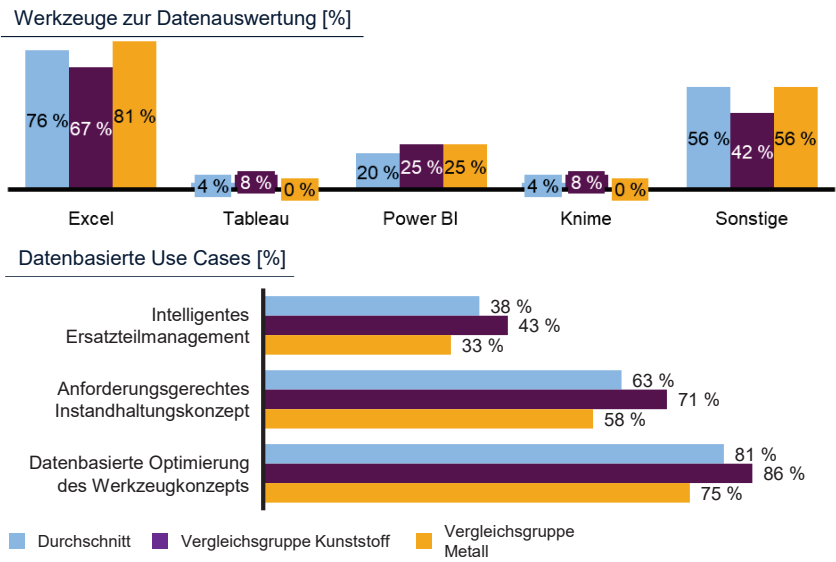


Abbildung 37: KBM – Werkzeuge zur Datenauswertung & Datenbasierte Use Cases³²⁶

Voraussetzung für die Nutzung von datenbasierten Anwendungsfällen ist ein werkzeuglebenszyklusübergreifendes Wissensmanagement. Insbesondere die langfristige Aufnahme und Speicherung von Wissen wird durch dezentral abgelegte Listen stark erschwert. Ein alle Werkzeuglebenszyklusphasen übergreifendes Wissensmanagementsystem wird lediglich von 20 % der Unternehmen eingesetzt. Die Hälfte der Unternehmen setzt sogar gar kein Wissensmanagementsystem ein. Die genaue Verteilung ist in Abbildung 170 im Anhang dargestellt.

Die Vorstellung der Ergebnisse des Konsortialbenchmarks Effiziente Werkzeuginstandhaltung belegt das zuvor erläuterte Praxisdefizit in Bezug auf die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Neben dem Benchmarking sind im Rahmen des durchgeführten Konsortialbenchmarks zudem auch Interviews mit den Teilnehmenden durchgeführt worden. Alle Teilnehmenden sehen in der Umsetzung einer effizienten Werkzeuginstandhaltung gemeinsam mit der Serienproduktion ein großes Potenzial, die Werkzeuglebenszykluskosten nachhaltig und zielgerichtet zu senken. Die effiziente Werkzeuginstandhaltung in Verbindung mit einer systematischen Datenaufnahme und -auswertung hat insbesondere für interne Werkzeugbaubetriebe das Potenzial, ein wettbewerbsdifferenzierender Faktor zu werden. Aktuell fehlt es jedoch an einem konkreten Zielbild sowie einem systematischen Vorgehen.

³²⁶ Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

Im Detail sehen sich Werkzeugbaubetriebe mit den drei bereits in Kapitel 2.1.7 angeführten Herausforderungen konfrontiert. Dazu zählen die systematische und anforderungsgerechte Erfassung der Werkzeuglebenszykluskosten und -daten über den gesamten Werkzeuglebenszyklus, die hohen Anforderungen an die Daten in Bezug auf den notwendigen Detaillierungsgrad und die benötigte Qualität für eine systematische Analyse sowie die notwendige Vergleichbarkeit von Werkzeugen und Formen.³²⁷ Mithilfe des Digitalen Schattens sowie der darauf aufbauenden datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse können Möglichkeiten erschlossen werden, diesen Herausforderungen zu begegnen. Dazu zählen das digitale Prozessabbild der relevanten Prozesse entlang des Werkzeuglebenszyklus, die dadurch mögliche Kosten- und Datentransparenz auf Bauteilebene sowie die Möglichkeit zur echtzeitfähigen Datenauswertung. Zur Realisierung der Chancen sowie zur Adressierung der genannten Herausforderungen sind fünf Handlungsfelder zu benennen, die den Handlungsbedarf aus der Praxis darstellen.

Die Basis bildet die Digitale Werkzeugakte, in der alle relevanten Werkzeugdaten und -kosten verwaltet werden. Weiterer Handlungsbedarf besteht bei der detaillierten Erfassung und Analyse der Daten und Kosten, um darauf aufbauend datenbasierte Use Cases konzeptionieren und implementieren zu können. Abschließend ist es notwendig, das werkzeuglebenszyklusübergreifende Wissen bedarfsgerecht zu dokumentieren und nutzerfreundlich abrufen zu können. Es besteht somit Handlungsbedarf aus der Praxis hinsichtlich eines praktikablen Ansatzes für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Der Handlungsbedarf aus der Praxis ist in der nachfolgenden Abbildung 38 abgebildet.

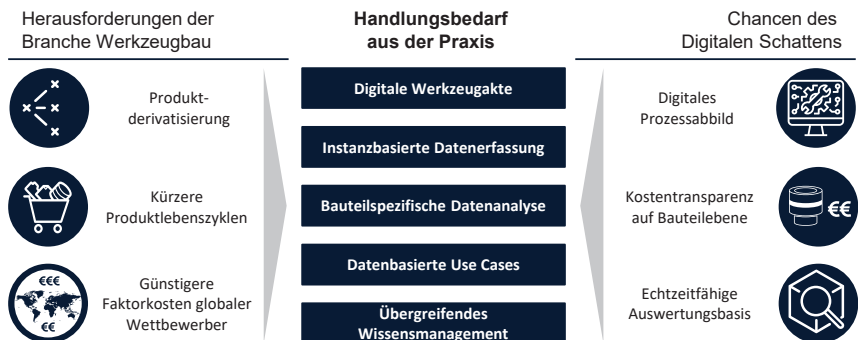


Abbildung 38: Handlungsbedarf aus der Praxis³²⁸

³²⁷ Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 23.

³²⁸ Eigene Darstellung i.A.a. Schultes (Gestaltungsmodell zur digitalen Vernetzung von Werkzeugbaubetrieben mit Lieferanten), S. 67

3 Analyse bestehender Ansätze

Im dritten Kapitel erfolgt die Analyse existierender Methoden und Modelle zur Adressierung des in Kapitel 2.4 identifizierten Handlungsbedarfs aus der Praxis. Dazu wird bereits bestehende wissenschaftliche Literatur unter dem Aspekt beleuchtet, inwiefern sie teilweise oder vollständig für die Beantwortung der Forschungsfrage herangezogen werden kann und ob eine Übertragbarkeit der Ansätze auf die Branche Werkzeugbau möglich ist. Der Inhalt dieses Kapitels entspricht damit der zweiten und dritten Phase der angewandten Forschung nach ULRICH, die in Kapitel 1.4 vorgestellt wird.

Zunächst wird die übergeordnete Analysesystematik sowie dahinterliegende Bewertungs- und Anforderungssysteme dargestellt. Gemäß dem forschungsmethodischen Vorgehen werden problemrelevante Ansätze der Wissenschaft vorgestellt und in Bezug auf die Erfüllung der definierten Anforderungen bewertet. Darauf aufbauend wird der Handlungsbedarf aus der Theorie abgeleitet. Das Kapitel schließt mit der Detaillierung der in Kapitel 1 definierten Forschungsfrage ab.

3.1 Bewertungssystematik

Für die einheitliche Bewertung und Analyse bestehender wissenschaftlicher Ansätze werden im ersten Schritt die Grundlagen der Bewertung erläutert. Dazu werden zunächst das Bewertungs- und das Anforderungssystem definiert. Das Bewertungssystem beschreibt die Systematik für die Bewertung der Eignung der einzelnen Ansätze im Hinblick auf die vorliegende Forschungsfrage. Das Anforderungssystem beschreibt hingegen die inhaltliche und strukturelle Bewertung der Ansätze mithilfe verschiedener Kriterien.³²⁹ Die Kriterien werden für eine bessere Übersichtlichkeit in übergeordnete Anforderungsdimensionen geclustert.

3.1.1 Bewertungssystem

Im Allgemeinen beschreibt ein Bewertungssystem die Ausprägungen eines für die Untersuchung relevanten Aspekts. Basierend auf vordefinierten Anforderungen wird dadurch ein einheitliches Analyseergebnis ermöglicht. Die Bewertung von theoretischen Ansätzen im Maschinenbau erfolgt oftmals mithilfe einer diskreten Ordinalskala mit verschiedenen Ausprägungen, die vorab definiert werden.³³⁰ Im Themenbereich Werkzeugbau wird eine solche Ordinalskala mit fünf unterschiedlichen Ausprägungen für die Bewertung wissenschaftlicher Ansätze verwendet, z. B. bei KOMOREK³³¹, KÜHN³³², PITSCH³³³ und HENSEN³³⁴. Diese Art des Bewertungssystems geht auf LIKERT³³⁵ zurück und ermöglicht eine differenzierte sowie robuste Bewertung

³²⁹ Vgl. Ulrich (Management), 1984, S. 193.

³³⁰ Vgl. South et al. (Effective Use of Likert Scales in Visualization Evaluations: A Systematic Review), 2022, S. 43-44.; Vgl. Brunner; Munzel (Nichtparametrische Datenanalyse), 2013, S. 1-2.

³³¹ Vgl. Komorek (Gestaltungsmodell für kollaborative Wertschöpfung im industriellen Werkzeugbau), 2014, S. 85.

³³² Vgl. Kühn (Lebenszyklusorientierte Leistungssysteme im Werkzeugbau), 2016, S. 59.

³³³ Vgl. Pitsch (Kompetenzfeldbasierte Vernetzung von Werkzeugbaustandorten), 2014, S. 84.

³³⁴ Vgl. Hensen (Strategische Auslegung industrieller Werkzeugbaubetriebe), 2017, S. 61.

³³⁵ Vgl. Likert (Measurement of Attitudes), 1932, S. 11-12.

unterschiedlicher Ansätze. Die fünf Ausprägungen zur Bewertung der Ansätze werden mit Hilfe von Harvey Balls, die in Abbildung 39 dargestellt sind, visualisiert.³³⁶



Abbildung 39: Harvey-Balls zur Visualisierung der Bewertung³³⁷

Eine Anforderung kann in dieser Skalierung in den Ausprägungen nicht erfüllt, geringfügig erfüllt, teilweise erfüllt, überwiegend erfüllt und vollumfänglich erfüllt vorliegen. Durch die Verwendung einer fünfgliedrigen Skala wird eine präzise Bewertung der Ergebnisse unterstützt.³³⁸

3.1.2 Anforderungssystem

Für die Bewertung der bereits existierenden Literaturansätze werden zunächst übergeordnete Anforderungsdimensionen definiert, die anschließend jeweils um spezifische Anforderungen ergänzt werden. Für die Herleitung der übergeordneten Anforderungsdimensionen wird auf die vier in Kapitel 2.1.7 vorgestellten Themenfelder der VDI-Norm 2884 zur Optimierung der Lebenszykluskosten zurückgegriffen. Eine genauere Betrachtung verdeutlicht, dass aus den vier Themenbereichen Abbildung, Erklärung, Prognose und Gestaltung der VDI-Norm 2884 vier übergeordnete Anforderungsdimensionen hergeleitet werden können. Aus dem ersten Themenfeld Abbildung, das als die ganzheitliche Abbildung und Erfassung der Lebenszykluskosten beeinflussenden Faktoren definiert ist, wird die Anforderungsdimension Ganzheitliches Datenmodell hergeleitet. Das Themenfeld Erklärung ist definiert als die Erklärung der Einflussfaktoren und ihrer Wechselwirkungen auf die Lebenszykluskosten. Aus diesem Themenfeld wird die Anforderungsdimension Systematische Datenerfassung und -erklärung abgeleitet. Die Anforderungsdimension Datenanalyse und -auswertung basiert auf dem Themenfeld Prognose, das definiert ist als Prognose der Lebenszykluskosten und -erlöse sowie nicht monetär erfassbarer Folgewirkungen von Entscheidungsalternativen. Der Themenbereich Gestaltung ist definiert als Erkennung von Möglichkeiten zur optimalen Gestaltung und Beeinflussung von Lebenszykluskosten und -erlösen sowie als Nutzung von Potenzialen zur Kostensenkung. Aus diesem Themenfeld wird die Anforderungsdimension Datenbasierte Anwendungsfälle abgeleitet.³³⁹ In Abbildung 40 ist die Herleitung der inhaltlichen Anforderungsdimensionen dargestellt.

³³⁶ Vgl. South et al. (Effective Use of Likert Scales in Visualization Evaluations: A Systematic Review), 2022, S. 43-48.; Vgl. Kett (Management Skills), 2010, S. 129.

³³⁷ i.A.a. Kett (Management Skills), 2010, S. 129.

³³⁸ Vgl. Dawes (Do data characteristics change according to the number of scale points used?), 2008, S. 61-77.

³³⁹ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 4.

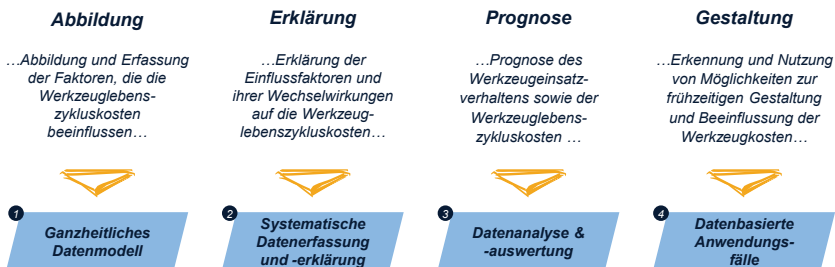


Abbildung 40: Herleitung der inhaltlichen Anforderungsdimensionen³⁴⁰

Als fünfte übergeordnete Anforderungsdimension wird der Betrachtungsbereich Werkzeugbau gewählt, da das primäre Anwendungsgebiet des Forschungsvorhabens wie in den Kapiteln 1.3 und 2.1 erläutert der Werkzeugbau ist. Ansätze, die nicht explizit für den Werkzeugbau entwickelt wurden, aber grundsätzlich auf den Werkzeugbau übertragen und angewendet werden können, werden entsprechend mit den gleichen Kriterien bewertet.

3.1.2.1 Anforderungsdimension Betrachtungsbereich Werkzeugbau

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich gemäß der in Kapitel 1.3 definierten Forschungsfrage mit der Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Passende Ansätze müssen daher werkzeugausspezifische Anforderungen erfüllen, indem der Erkenntnis-transfer auf den Werkzeugbau mit Fokus auf Blech- und Massivumformwerkzeuge sowie alle Phasen des Lebenszyklus eines Werkzeugs adressiert werden.

Werkzeuge sind dadurch gekennzeichnet, dass sie in geringer Stückzahl gefertigt werden und die Fertigungsprozessfolgen der Werkzeugbauteile eine geringe bis gar keine Wiederholbarkeit aufweisen.³⁴¹ Falls ein Ansatz nicht einmal für die produzierende Industrie konzeptioniert worden ist, wird die Anforderung nicht erfüllt. Wird hingegen zumindest ein Erkenntnis-transfer auf die produzierende Industrie ermöglicht, wird die Anforderung geringfügig erfüllt. Für den Fall, dass der Erkenntnistransfer auf die Einzel- und Kleinserienfertigung möglich ist, wird die Anforderung teilweise erfüllt. Für eine überwiegende Erfüllung der Anforderung ist es notwendig, dass die hohe Heterogenität der Arbeitsschritte und der Unikatcharakter der einzelnen Bauteile spezifisch für die Branche Werkzeugbau berücksichtigt werden. Für die vollumfängliche Erfüllung der Anforderungen müssen darüber hinaus in einem Ansatz die Besonderheiten der Blech- und Massivumformwerkzeuge adressiert werden. Blech- und Massivumformwerkzeuge sind stark verschleißbehaftet und weisen entsprechend große Einsparpotenziale in Bezug auf das Werkzeug-Maschine-System, z. B. die Kombination aus Umformwerkzeug und Presse, auf.³⁴² Der Fokus dieser Arbeit liegt entsprechend auf diesen Werkzeugen. Die fünf Ausprägungen werden nachfolgend definiert:³⁴³

³⁴⁰ Eigene Darstellung

³⁴¹ Vgl. Kühn (Lebenszyklusorientierte Leistungssysteme im Werkzeugbau), 2016, S. 65.

³⁴² Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 16-17.

³⁴³ Vgl. Komorek (Gestaltungsmodell für kollaborative Wertschöpfung im industriellen Werkzeugbau), 2014, S. 70.

- **Nicht erfüllt:** Der Ansatz ermöglicht keinen Erkenntnistransfer.
- **Geringfügig erfüllt:** Der Ansatz ermöglicht den Erkenntnistransfer auf die produzierende Industrie.
- **Teilweise erfüllt:** Der Ansatz ermöglicht den Erkenntnistransfer auf die Einzel- und Kleinserienfertigung.
- **Überwiegend erfüllt:** Der Ansatz ermöglicht den Erkenntnistransfer auf die Branche Werkzeugbau.
- **Vollumfänglich erfüllt:** Der Ansatz ermöglicht den Erkenntnistransfer auf die Branche Werkzeugbau mit Fokus auf Blech- und Massivumformwerkzeuge.

Für eine ganzheitliche Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten müssen die drei Phasen Werkzeugbereitstellung, Werkzeugnutzung und Werkzeugausrüstung betrachtet werden.³⁴⁴ Die Werkzeugnutzungsphase ist bei den Blech- und Massivumformwerkzeugen mit 55 % die kapitalintensivste Phase, gefolgt von der Werkzeugbereitstellungsphase mit 45 %.³⁴⁵ Die dritte Phase der Werkzeugausrüstung wird in früheren Ansätzen häufig nicht berücksichtigt, ist aber insbesondere im Hinblick auf eine vollständige Betrachtung unbedingt zu berücksichtigen.³⁴⁶ Es besteht daher die Anforderung für in Frage kommende Ansätze, die drei genannten Lebenszyklusphasen eines Werkzeugs zu berücksichtigen, wobei die Werkzeugnutzungsphase bezogen auf die Themenstellung dieser Dissertation die relevanteste Phase, die Werkzeugbereitstellungsphase die zweit relevanteste Phase und die Werkzeugausrüstungsphase die am wenigsten relevante Phase ist. Die fünf Ausprägungen werden im Folgenden definiert:

- **Nicht erfüllt:** Der Ansatz bezieht sich auf keine der drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen oder nur auf die Werkzeugausrüstungsphase.
- **Geringfügig erfüllt:** Der Ansatz bezieht sich nur auf die Werkzeugbereitstellungsphase.
- **Teilweise erfüllt:** Der Ansatz bezieht sich nur auf die Werkzeugnutzungsphase.
- **Überwiegend erfüllt:** Der Ansatz bezieht sich nur auf die Werkzeugnutzungs- und die Werkzeugbereitstellungsphase.
- **Vollumfänglich erfüllt:** Der Ansatz bezieht sich auf alle drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen.

3.1.2.2 Anforderungsdimension Ganzheitliches Datenmodell

Ein Ansatz zur datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse muss alle Daten entlang des Werkzeuglebenszyklus berücksichtigen. Dazu ist ein ganzheitliches Datenmodell notwendig, das sowohl Werkzeugdaten als auch Werkzeugkosten über den gesamten Lebenszyklus des Werkzeugs beinhaltet.³⁴⁷

³⁴⁴ Vgl. VDMA (Berechnung von Lebenszykluskosten), 2012, S. 6.

³⁴⁵ Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 16-17.

³⁴⁶ Vgl. Schuh et al. („Kostengünstigere“ Werkzeuge durch Lebenszykluskostenbetrachtung), 2013, S. 973; Vgl. VDMA (Berechnung von Lebenszykluskosten), 2012, S. 6.,

³⁴⁷ Vgl. Schuh et al. („Kostengünstigere“ Werkzeuge durch Lebenszykluskostenbetrachtung), 2013, S. 972; Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 16-17.

Voraussetzung für die Analyse und Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten ist Kostentransparenz über den gesamten Werkzeuglebenszyklus.³⁴⁸ Zur ganzheitlichen Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten ist folglich die ganzheitliche Aufnahme der Werkzeugkosten während der drei Phasen Werkzeugbereitstellung, Werkzeugnutzung und Werkzeugausmusterung erforderlich.³⁴⁹ Je Werkzeuglebenszyklusphase ist dazu die Angabe der jeweiligen Kostenpositionen sowie der Kostenelemente je Kostenposition notwendig. Die detaillierte Angabe der Kostenpositionen sowie der Kostenelemente je Kostenposition ist notwendig, um gezielt Kostentreiber identifizieren und die Effektivität einer umgesetzten Maßnahme bewerten zu können. Große Einsparpotenziale in Bezug auf das Werkzeug-Maschine-System, z. B. die Kombination aus Umformwerkzeug und Presse, ergeben sich insbesondere durch die hohen Beschaffungs-, Instandhaltungs- und Ersatzteilkosten. Speziell Stanz- und Massivumformwerkzeuge zeichnen sich durch hohe Nutzungskosten von oft mehr als 50 % der gesamten Werkzeuglebenszykluskosten aus.³⁵⁰ Entsprechend ist die Erfassung und Auswertung der Werkzeugnutzungskosten von größter, die Erfassung und Auswertung der Werkzeugbereitstellungskosten von zweitwichtigster und die Aufnahme und Auswertung der Werkzeugausmusterungskosten von geringster Wichtigkeit. Im direkten Vergleich ist die Vollständigkeit der Kostenpositionen und der zugehörigen Kostenelemente je Werkzeuglebenszyklusphase höher zu bewerten als die Abbildung aller Werkzeuglebenszyklusphasen. Die fünf Ausprägungen der Anforderung Werkzeuglebenszykluskosten werden im Folgenden definiert:

- **Nicht erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die Werkzeugkosten in keiner der drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen.
- **Geringfügig erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die Werkzeugkosten in der Werkzeugbereitstellungs- oder der Werkzeugnutzungsphase und gibt die Kostenpositionen für eine der beiden genannten Werkzeuglebenszyklusphasen an ohne die Kostenelemente je aufgeführter Kostenposition zu erläutern.
- **Teilweise erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die Werkzeugkosten in der Werkzeugbereitstellungs- oder der Werkzeugnutzungsphase, gibt die Kostenpositionen für eine der beiden genannten Werkzeuglebenszyklusphasen an und erläutert die Kostenelemente je aufgeführter Kostenposition.
- **Überwiegend erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die Werkzeugkosten in der Werkzeugbereitstellungs- und Werkzeugnutzungsphase, gibt die Kostenpositionen für die beiden genannten Werkzeuglebenszyklusphasen an und erläutert die Kostenelemente je aufgeführter Kostenposition.
- **Vollumfänglich erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die Werkzeugkosten in allen drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen, gibt die Kostenpositionen je Werkzeuglebenszyklusphase an und erläutert die Kostenelemente je Kostenposition.

Zusätzlich zur ganzheitlichen Aufnahme der Werkzeuglebenszykluskosten ist die vollständige Erfassung der Werkzeugdaten inklusive der zu berücksichtigenden Betriebsumgebung für die

³⁴⁸ Vgl. Schuh et al. („Kostengünstigere“ Werkzeuge durch Lebenszykluskostenbetrachtung), 2013, S. 972.

³⁴⁹ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 5.

³⁵⁰ Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 11; 16–17.

drei Phasen Werkzeugbereitstellung, Werkzeugnutzung und Werkzeugausmusterung notwendig, um aussagekräftige Analysen durchführen, Ursache-Wirkungszusammenhänge identifizieren und die Werkzeuglebenszykluskosten langfristig reduzieren zu können.³⁵¹ Je umfassender die Datenbasis der Lebenszykluskostenanalyse ist, umso umfangreicher können Einsparpotenziale im Werkzeugbau sowie der Serienproduktion realisiert werden. Da der Großteil der Werkzeuglebenszykluskosten während der Werkzeugnutzungsphase anfällt, müssen insbesondere die Daten aus der Nutzungsphase des Werkzeugs betrachtet werden.³⁵² Der Analogie bei den Werkzeuglebenszykluskosten folgend ist die Erfassung der Werkzeugdaten während der Werkzeugbereitstellungsphase im Kontext dieser Arbeit relevanter als während der Werkzeugverwertungsphase. Die fünf Ausprägungen der Anforderung Werkzeuglebenszyklusdaten werden im Folgenden definiert:

- **Nicht erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die Werkzeugdaten in keiner der drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen.
- **Geringfügig erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die Werkzeugdaten in der Werkzeugbereitstellungs- oder der Werkzeugnutzungsphase ohne die Werkzeugdaten konkret zu nennen und die Betriebsumgebung anzugeben.
- **Teilweise erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die Werkzeugdaten in der Werkzeugbereitstellungs- oder Werkzeugnutzungsphase, nennt konkret die Werkzeugdaten und gibt die zu berücksichtigende Betriebsumgebung an.
- **Überwiegend erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die Werkzeugdaten in der Werkzeugbereitstellungs- und der Werkzeugnutzungsphase, nennt konkret die Werkzeugdaten und gibt die zu berücksichtigende Betriebsumgebung an.
- **Vollumfänglich erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die Werkzeugdaten in allen drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen, nennt konkret die Werkzeugdaten und gibt die zu berücksichtigende Betriebsumgebung an.

3.1.2.3 Anforderungsdimension Systematische Datenerfassung und -erklärung

Eine systematische Datenerfassung und -erklärung bildet die Grundlage für eine aussagefähige Datenanalyse und -auswertung. Dazu ist ein ganzheitliches Erfassungskonzept notwendig, das die verfälschungssichere Erfassung der Werkzeugdaten und -kosten über den gesamten Lebenszyklus garantiert. Zudem müssen die Daten für jede Werkzeugkomponente einzeln und in ausreichender Qualität erfasst werden.³⁵³

Als Input für die bauteilspezifische Datenanalyse ist ein voranalysierter und bereinigter Datensatz notwendig.³⁵⁴ Da der Aufwand der Datenvorbereitung bis zu 70 % des Gesamtaufwands eines Projekts betragen kann, ist ein Erfolgsfaktor die Sicherstellung einer guten Datenqualität

³⁵¹ Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 16-17.; Vgl. Tönshoff et al. (Lebenszykluskosten von Werkzeugen und Formen), 2005, S. 872-876.

³⁵² Vgl. Schweiger (Nachhaltige Wettbewerbsvorteile für Anbieter und Nutzer von Maschinen/Anlagen), 2009, S. 22-24.

³⁵³ Vgl. Hildebrand et al. (Daten- und Informationsqualität), 2021, S. 88.; Vgl. Lee et al. (Journey to data quality), 2006, S. 13; 27.

³⁵⁴ Vgl. Benning; Wenger (Smart-Data-Management), 2022, S. 198-199.

bereits während der Erfassung, um den Aufwand für die nachfolgende Datenbereinigung möglichst gering zu halten.³⁵⁵ Die Qualität und Aussagefähigkeit der Datenanalyse und -auswertung ist zudem in starkem Maße abhängig von der Qualität, der Vielfältigkeit, dem Volumen sowie der Übertragungsrates der Daten.³⁵⁶ Die Anforderung ganzheitliches Erfassungskonzept stellt die fehlerminimierende und verfälschungssichere Erfassung der Werkzeugdaten und -kosten während der Werkzeugbereitstellung, der Werkzeugnutzung sowie der Werkzeugausmusterung sicher. Die Relevanz der drei genannten Phasen ist analog zu den zuvor definierten Anforderungen. Die fünf Ausprägungen der Anforderung ganzheitliches Erfassungskonzept werden nachfolgend definiert:

- **Nicht erfüllt:** Der Ansatz betrachtet ein ganzheitliches Erfassungskonzept für die Werkzeugdaten und -kosten in keiner der drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen.
- **Geringfügig erfüllt:** Der Ansatz betrachtet ein ganzheitliches Erfassungskonzept für die Werkzeugdaten und -kosten für die Phase der Werkzeugbereitstellung oder die Phase der Werkzeugnutzung ohne konkrete Handlungsempfehlungen für eine fehlerminimierende und verfälschungssichere Erfassung vorzustellen.
- **Teilweise erfüllt:** Der Ansatz betrachtet ein ganzheitliches Erfassungskonzept für die Werkzeugdaten und -kosten für die Phase der Werkzeugbereitstellung oder die Phase der Werkzeugnutzung und stellt konkrete Handlungsempfehlungen für eine fehlerminimierende und verfälschungssichere Erfassung vor.
- **Überwiegend erfüllt:** Der Ansatz betrachtet ein ganzheitliches Erfassungskonzept für die Werkzeugdaten und -kosten für die Phasen der Werkzeugbereitstellung und der Werkzeugnutzung und stellt konkrete Handlungsempfehlungen für eine fehlerminimierende und verfälschungssichere Erfassung vor.
- **Vollumfänglich erfüllt:** Der Ansatz betrachtet ein ganzheitliches Erfassungskonzept für die Werkzeugdaten und -kosten für alle drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen und stellt konkrete Handlungsempfehlungen für eine fehlerminimierende und verfälschungssichere Erfassung vor.

In Ergänzung zur Anforderung ganzheitliches Erfassungskonzept ist die Anforderung instanzbasierte Erfassung notwendig, um sicherzustellen, dass die Erfassung der Daten nicht übergeordnet auf Typebene, sondern untergeordnet auf Instanzebene entlang der drei Werkzeuglebenszyklusphasen erfolgt. Nur bei einer instanzbasierten Datenerfassung können die Daten verursachungsgerecht der jeweiligen Werkzeugkomponente zugeordnet werden. Die Erfassung auf der Instanzebene ist eine Voraussetzung für aussagekräftige Datenanalysen und -auswertungen.³⁵⁷ Eine zweite Voraussetzung ist die Sicherstellung einer anforderungsgerechten Datenqualität. Nach VDI-NORM 3714 beschreibt der Begriff Datenqualität die individuellen Eigenschaften eines Datenbestands. Der Übereinstimmungsgrad dieser Eigenschaften

³⁵⁵ Vgl. Rollins (Foundational Methodology for Data Science), 2015, S. 1-6.

³⁵⁶ Vgl. Mauro et al. (A formal definition of Big Data), 2016, S. 122.; Vgl. Shearer (The CRISP-DM model), 2000, S. 13-14.

³⁵⁷ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 3714 - Blatt 1), 2022, S. 3-4.; Vgl. Rohweder et al. (Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe), 2021, S. 28.

mit den für die Datenanalyse festgesetzten Anforderungen ergibt den Eignungsgrad der Daten für das definierte Projektziel. Die Datenqualität kann entsprechend nur im Zusammenhang mit der Datennutzung und Datenerzeugung beurteilt werden.³⁵⁸ Nur wenn die Inputdaten der geforderten Informationsqualität entsprechen, können mithilfe der Datenanalyse belastbare Ergebnisse erzielt werden. Die fünf Ausprägungen der Anforderungen instanzbasierte Erfassung werden im Folgenden definiert:

- **Nicht erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die instanzbasierte Erfassung der Werkzeugdaten und -kosten in keiner der drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen.
- **Geringfügig erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die instanzbasierte Erfassung der Werkzeugdaten und -kosten für die Phase der Werkzeugbereitstellung oder die Phase der Werkzeugnutzung und berücksichtigt dabei nicht die Sicherstellung einer anforderungsgerechten Datenqualität.
- **Teilweise erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die instanzbasierte Erfassung der Werkzeugdaten und -kosten für die Phase der Werkzeugbereitstellung oder die Phase der Werkzeugnutzung und berücksichtigt die Sicherstellung einer anforderungsgerechten Datenqualität.
- **Überwiegend erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die instanzbasierte Erfassung der Werkzeugdaten und -kosten für die Phasen der Werkzeugbereitstellung und Werkzeugnutzung und berücksichtigt die Sicherstellung einer anforderungsgerechten Datenqualität.
- **Vollumfänglich erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die instanzbasierte Erfassung der Werkzeugdaten und -kosten für alle drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen und berücksichtigt die Sicherstellung einer anforderungsgerechten Datenqualität.

3.1.2.4 Anforderungsdimension Datenanalyse und -auswertung

Mithilfe der Datenanalyse und -auswertung können die Werkzeuglebenszyklusdaten und -kosten rückblickend für die Phasen der Werkzeugbereitstellung, der Werkzeugnutzung und der Werkzeugausmusterung analysiert und ausgewertet werden, um das Werkzeugeinsatzverhalten sowie die Werkzeuglebenszykluskosten für die Zukunft zu prognostizieren. Dazu ist zum einen eine systematische Bedarfsableitung für die einzelnen Stakeholder sowie zum anderen die Überführung in anwenderbezogene und anforderungsgerechte Kennzahlen zur gezielten Steuerung notwendig.³⁵⁹

Die systematische Bedarfsableitung ist notwendig, sodass der Bedarf für die Datenanalyse und -auswertung entlang der drei Werkzeuglebenszyklusphasen systematisch und anforderungsgerecht hergeleitet wird, um von Projektbeginn an eine möglichst effiziente Lösungsentwicklung anzustreben und eine effektive Lösung zu entwickeln.³⁶⁰ Die fünf Ausprägungen der Anforderung systematische Bedarfsableitung sind nachfolgend definiert:

³⁵⁸ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 3714 - Blatt 2), 2022, S. 3-4.

³⁵⁹ Vgl. Martinez-Plumed et al. (CRISP-DM Twenty Years Later), 2020, S. 1.; Vgl. Shearer (The CRISP-DM model), 2000, S. 13-14.

³⁶⁰ Vgl. Rahul; Banyal (Data Life Cycle Management in Big Data Analytics), 2020, S. 364-370; Vgl. Wing (The Data Life Cycle), 2019, S. 2-4.

- **Nicht erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die systematische Bedarfsableitung für keine der drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen.
- **Geringfügig erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die systematische Bedarfsableitung für verschiedene Stakeholder unter Berücksichtigung des Werkzeugeinsatzverhaltens sowie der Werkzeugkosten für die Werkzeugbereitstellungs- oder die Werkzeugnutzungsphase ohne diese in einem mehrschrittigen Vorgehen zu erläutern.
- **Teilweise erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die systematische Bedarfsableitung für verschiedene Stakeholder unter Berücksichtigung des Werkzeugeinsatzverhaltens sowie der Werkzeugkosten für die Werkzeugbereitstellungs- oder die Werkzeugnutzungsphase und beschreibt diese in einem mehrschrittigen Vorgehen.
- **Überwiegend erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die systematische Bedarfsableitung für verschiedene Stakeholder unter Berücksichtigung des Werkzeugeinsatzverhaltens sowie der Werkzeugkosten für die Werkzeugbereitstellungs- und Werkzeugnutzungsphase und beschreibt diese in einem mehrschrittigen Vorgehen.
- **Vollumfänglich erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die systematische Bedarfsableitung für verschiedene Stakeholder unter Berücksichtigung des Werkzeugeinsatzverhaltens sowie der Werkzeugkosten für alle drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen und beschreibt diese in einem mehrschrittigen Vorgehen.

Die Anforderung systematische Bedarfsableitung wird komplementiert durch die Anforderung anwenderbezogene Kennzahlenentwicklung. Damit wird sichergestellt, dass die systematisch abgeleiteten Informationsbedarfe je nach Anwendendem anforderungsgerecht entlang der drei Werkzeuglebenszyklusphasen in nachzuverfolgende Kennzahlen überführt werden. Dabei sind unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen. Zunächst sollten bei der Entwicklung der Kennzahlen verschiedene Stakeholder Berücksichtigung finden, um sicherzustellen, dass die Kennzahlen den Anforderungen der unterschiedlichen Anwendenden gerecht werden.³⁶¹ Darüber hinaus sollen die Kennzahlen systematisch für den Anwendungsbereich datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse und -auswertung entwickelt werden, um später im Anwendungszusammenhang Transparenz und damit die Basis für eine gezielte Steuerung zu schaffen. Die fünf Ausprägungen der Anforderung anwenderbezogene Kennzahlenentwicklung sind nachfolgend definiert:

- **Nicht erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die anwenderbezogene Kennzahlenentwicklung für keine der drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen.
- **Geringfügig erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die anwenderbezogene Kennzahlenentwicklung für die Werkzeugbereitstellungs- oder die Werkzeugnutzungsphase unter Berücksichtigung verschiedener Stakeholder ohne Thematisierung der Steuerungsfunktion im Zusammenhang der Datenanalyse und -auswertung.
- **Teilweise erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die anwenderbezogene Kennzahlenentwicklung für die Werkzeugbereitstellungs- oder die Werkzeugnutzungsphase unter Berücksichtigung verschiedener Stakeholder und thematisiert die Steuerungsfunktion im Zusammenhang der Datenanalyse und -auswertung.

³⁶¹ Vgl. Ungermann et al. (Data Analytics for Manufacturing Systems), 2019, S. 371-373.

- **Überwiegend erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die anwenderbezogene Kennzahlenentwicklung für die Werkzeugbereitstellungs- und Werkzeugnutzungsphase unter Berücksichtigung verschiedener Stakeholder und thematisiert die Steuerungsfunktion im Zusammenhang der Datenanalyse und -auswertung.
- **Vollumfänglich erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die anwenderbezogene Kennzahlenentwicklung für alle drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen unter Berücksichtigung verschiedener Stakeholder und thematisiert die Steuerungsfunktion im Zusammenhang der Datenanalyse und -auswertung.

3.1.2.5 Anforderungsdimension Datenbasierte Anwendungsfälle

Die Anforderungsdimension datenbasierte Anwendungsfälle baut für den Betrachtungsbereich Werkzeugbau auf den vorangegangenen Anforderungsdimensionen ganzheitliches Datenmodell, systematische Datenerfassung und -erklärung sowie Datenanalyse und -auswertung auf und stellt die Erkennung und Nutzung von Möglichkeiten zur frühzeitigen Gestaltung und Beeinflussung des Werkzeugeinsatzverhaltens sowie der Werkzeuglebenszykluskosten sicher. Dazu sind die beiden Anforderungen systematische Use Case Entwicklung sowie qualitative und quantitative Use Case Bewertung notwendig.

Für die systematische Use Case Entwicklung ist es notwendig, dass mögliche Anwendungsfälle, die auf Werkzeugdaten und Werkzeugkosten entlang des Werkzeuglebenszyklus basieren, entlang des Werkzeuglebenszyklus systematisch identifiziert sowie anforderungs- und anwendergerecht entwickelt werden. Dazu ist ein mehrschrittiges und strukturiertes Vorgehen notwendig.³⁶² Die fünf Ausprägungen der Anforderung systematische Use Case Entwicklung sind nachfolgend definiert:

- **Nicht erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die systematische Use Case Entwicklung für keine der drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen.
- **Geringfügig erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die systematische Use Case Entwicklung zur frühzeitigen Gestaltung und Beeinflussung des Werkzeugeinsatzverhaltens sowie der Werkzeuglebenszykluskosten bezogen auf die Werkzeugbereitstellungs- oder die Werkzeugnutzungsphase.
- **Teilweise erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die systematische Use Case Entwicklung in einem mehrschrittigen Vorgehen zur frühzeitigen Gestaltung und Beeinflussung des Werkzeugeinsatzverhaltens sowie der Werkzeuglebenszykluskosten bezogen auf die Werkzeugbereitstellungs- oder die Werkzeugnutzungsphase.
- **Überwiegend erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die systematische Use Case Entwicklung in einem mehrschrittigen Vorgehen zur frühzeitigen Gestaltung und Beeinflussung des Werkzeugeinsatzverhaltens sowie der Werkzeuglebenszykluskosten bezogen auf die Werkzeugbereitstellungs- und Werkzeugnutzungsphase.
- **Vollumfänglich erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die systematische Use Case Entwicklung in einem mehrschrittigen Vorgehen zur frühzeitigen Gestaltung und Beeinflussung

³⁶² Vgl. Benning; Wenger (Smart-Data-Management), 2022, S. 191.; Vgl. ISO/IEC JTC 1 Information technology, (ISO/IEC 19505-2), 2012, S. 603-614.; Vgl. Shearer (The CRISP-DM model), 2000, S. 13-14.

des Werkzeugeinsatzverhaltens sowie der Werkzeuglebenszykluskosten bezogen auf alle drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen.

Ergänzend folgt die Anforderung qualitative und quantitative Use Case Bewertung, die die systematische Bewertung und Priorisierung der datenbasierten Anwendungsfälle entlang der drei Werkzeuglebenszyklusphasen sicherstellt, um ein möglichst gutes Nutzen-Aufwand-Verhältnis bei den umzusetzenden Anwendungsfällen zu erzielen. Dazu ist ein systematisches Vorgehen in mehreren Schritten notwendig.³⁶³ Die fünf Ausprägungen der Anforderung qualitative und quantitative Use Case Bewertung sind nachfolgend definiert:

- **Nicht erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die qualitative und quantitative Use Case Bewertung für keine der drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen.
- **Geringfügig erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die qualitative und quantitative Use Case Bewertung in einem mehrschrittigen Vorgehen für die Werkzeugbereitstellungs- oder Werkzeugnutzungsphase.
- **Teilweise erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die qualitative und quantitative Use Case Bewertung in einem mehrschrittigen Vorgehen für die Werkzeugbereitstellungs- oder Werkzeugnutzungsphase und enthält eine Priorisierung der Use-Cases nach Aufwand und Nutzen.
- **Überwiegend erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die qualitative und quantitative Use Case Bewertung in einem mehrschrittigen Vorgehen für die Werkzeugbereitstellungs- und Werkzeugnutzungsphase und enthält eine Priorisierung der Use-Cases nach Aufwand und Nutzen.
- **Vollumfänglich erfüllt:** Der Ansatz betrachtet die qualitative und quantitative Use Case Bewertung in einem mehrschrittigen Vorgehen für alle drei genannten Werkzeuglebenszyklusphasen und enthält eine Priorisierung der Use-Cases nach Aufwand und Nutzen.

In der nachfolgenden Abbildung 41 sind die Anforderungsdimensionen dargestellt.



Abbildung 41: Übersicht Anforderungsdimensionen³⁶⁴

³⁶³ Vgl. Schuh et al. (Industrie 4.0: Implement it!), 2018, S. 41-49.; Vgl. Grenning (Planning poker or how to avoid analysis paralysis while release planning), 2002, S. 22-23.

³⁶⁴ Eigene Darstellung

3.2 Beschreibung und Bewertung bestehender Ansätze

Eine Analyse der wissenschaftlichen Literatur zeigt, dass einige Ansätze existieren, die die Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse thematisieren. Damit die Literatur ganzheitlich abgebildet werden kann, werden Ansätze mit Bezug zu den Themen Werkzeuglebenszyklusdaten und -kosten, Lebenszyklusanalyse und lebenszyklusübergreifende Vernetzung recherchiert und analysiert. Die im Kontext dieser Arbeit als relevant eingestuft wissenschaftlichen nationalen und internationalen Ansätze werden im weiteren Verlauf einer detaillierten Untersuchung unterzogen. Die Reihenfolge der Vorstellung orientiert sich am Erscheinungszeitpunkt des jeweiligen Ansatzes.

3.2.1 “Low-Cost” Tools Through Life Cycle Observation

SCHUH ET AL. beschreibt in seinem Ansatz das im Rahmen des Total Efficiency Control (TEC) Forschungsvorhabens entwickelte Kalkulationstool, das die transparente Vorhersage der Werkzeuglebenszykluskosten von Spritzgusswerkzeugen ermöglichen soll.³⁶⁵ Eine Voraussetzung zur transparenten Vorhersage der Werkzeuglebenszykluskosten ist ein ganzheitliches Referenzmodell für die Werkzeuglebenszyklusüberwachung. Dafür definieren die Autoren die vier generischen Lebenszyklusphasen Werkzeugentwicklung, Werkzeugfertigung inkl. Zusammenbau und Try-out, Werkzeugnutzung und Werkzeugrecycling. Für diese vier generischen Phasen werden im Rahmen des Forschungsprojekts TEC weitere Subphasen detailliert und die Einflussfaktoren auf die Werkzeuglebenszykluskosten abgeleitet. Dabei werden die drei Basis Qualitätscluster Volumen, Materialeigenschaften und Oberflächeneigenschaften sowie die sieben weiteren die Werkzeugkomplexität beschreibenden Faktoren, Komplexität der Produktgeometrie, Komplexität der Spritzgießtechnik, Komplexität der Werkzeuggeometrie, Komplexität der Werkzeugmechanik, Komplexität des Einspritzkonzeptes, Komplexität der Entlüftung, Komplexität der Temperaturregelung sowie Grad der Standardisierung identifiziert. Im weiteren Verlauf des Projekts werden die Korrelationen zwischen den einzelnen Kriterien sowie den identifizierten Kostenpositionen systematisch hergeleitet und darauf aufbauend das RCCT-Tool zur transparenten Vorhersage der Werkzeuglebenszykluskosten von Spritzgießwerkzeugen entwickelt. In der nachfolgenden Abbildung 42 ist der Konfigurationsbildschirm des RCCT-Tools für den Vergleich von zwei Werkzeugvarianten dargestellt.³⁶⁶

³⁶⁵ Vgl. Schuh et al. (“Low-Cost” Tools Through Life Cycle Observation), 2014, S. 526.

³⁶⁶ Vgl. Schuh et al. (“Low-Cost” Tools Through Life Cycle Observation), 2014, S. 526-530.

Quality Cluster	Tool Quality		
	Reference Tool	Variant 1	Variant 2
Volume	4,0	 6,9	 3,1
Material Properties	4,0	 7,7	 3,5
Surface Properties	4,0	 4,1	 3,4
Complexity of Product Geometry	4,0	 5,3	 5,8
Complexity of Molding Technology	4,0	 4,5	 3,3
Complexity of Tool Geometry	4,0	 8,3	 3,6
Complexity of Tool Mechanics	4,0	 5,9	 3,3
Complexity of Injection Concept	4,0	 7,7	 3,7
Complexity of Ventilation	4,0	 7,1	 3,1
Complexity of Temperature Control	4,0	 5,4	 3,4
Degree of Standardization	4,0	 5,0	 3,8

Abbildung 42: Konfigurationsbildschirm des RCCT-Tools³⁶⁷

Die Kategorie Betrachtungsbereich wird durch den Ansatz überwiegend erfüllt. Der Ansatz ist explizit für die Einzel- und Kleinserienfertigung sowie besonders für die Branche Werkzeugbau entwickelt worden. Der Ansatz deckt alle Werkzeuglebenszyklusphasen ab, bezieht sich jedoch auf Spritzgießwerkzeuge und nicht auf Blech- und Massivumformwerkzeuge. Die Bewertungskategorie Ganzheitliches Datenmodell wird überwiegend bis vollumfänglich erfüllt. SCHUH ET AL. präsentieren ein detailliertes Werkzeuglebenszykluskostenmodell und zeigen die Korrelationen zwischen den Haupteinflussfaktoren und den Werkzeuglebenszykluskosten detailliert auf. Der Fokus liegt dabei primär auf den Werkzeugkosten. Für die Werkzeuglebenszyklusdaten werden relevante Datenkategorien in den Phasen Werkzeugbereitstellung und Werkzeugnutzung genannt. Die Kategorien Systematische Datenerfassung, Datenanalyse und -auswertung sowie Datenbasierte Anwendungsfälle werden nicht erfüllt. Der Fokus der Autoren liegt ausschließlich auf der Konzeption eines ganzheitlichen Tools für die transparente Vorhersage der Werkzeuglebenszykluskosten auf Basis zuvor bereits bekannter Faktoren wie zum Beispiel der Materialeigenschaften, der Produktkomplexität oder Oberflächeneigenschaften. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der präsentierte Ansatz nicht zur Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse anwendbar ist. Insbesondere im Bereich des ganzheitlichen Datenmodells bietet er teilweise interessante Denkanstöße. In Abbildung 43 ist die Bewertung des “Low-Cost” Tools Through Life Cycle Observation nach SCHUH ET AL. dargestellt.

³⁶⁷ Vgl. Schuh et al. (“Low-Cost” Tools Through Life Cycle Observation), 2014, S. 529.

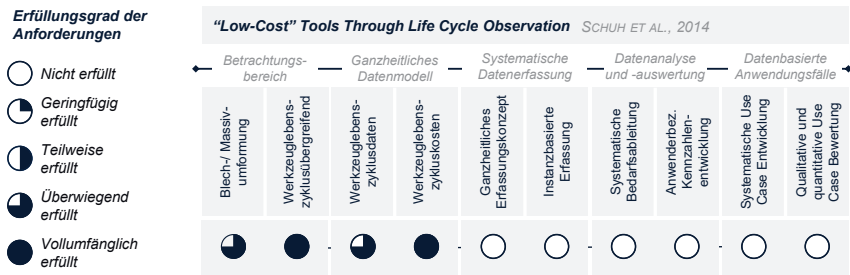


Abbildung 43: Bewertung "Low-Cost" Tools Through Life Cycle Observation³⁶⁸

3.2.2 Lebenszyklusorientierte Leistungssysteme

KÜHN verfolgt mit der entwickelten Methodik die nachhaltige Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Werkzeugbaubetrieben durch eine kundenorientierte Entwicklung von Leistungssystemen entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus. Die Leistungssysteme bestehen neben dem Werkzeug als Kernprodukt aus zusätzlichen industriellen Sach- und Dienstleistungen entlang des Werkzeuglebenszyklus.³⁶⁹ Der Aufbau der Methodik ist in Abbildung 44 dargestellt.

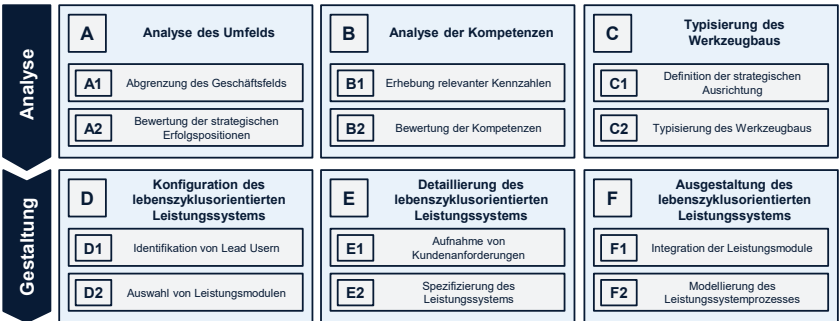


Abbildung 44: Methodik zur Gestaltung von lebenszyklusorientierten Leistungssystemen³⁷⁰

Der erste *Schritt A* der Methodik dient der Analyse des Umfelds des Werkzeugbaubetriebs. Dazu erfolgt im Detailschritt A1 die Auswahl des Geschäftsfelds aus Markt- und Ressourcen-sicht zur Gestaltung lebenszyklusorientierter Leistungssysteme. Im zweiten Detailschritt A2 folgt die Bewertung der strategischen Erfolgspositionen des ausgewählten Geschäftsfelds. Mit Hilfe von leistungsbezogenen und funktionalen strategischen Erfolgspositionen wie zum Beispiel Termintreue, Produktionssicherheit oder Innovationskraft können Unternehmen im Vergleich zum Wettbewerb überdurchschnittliche Ergebnisse erzielen. Im zweiten *Schritt B* wer-

³⁶⁸ Eigene Darstellung

³⁶⁹ Vgl. Kühn (Lebenszyklusorientierte Leistungssysteme im Werkzeugbau), 2016, S. 4.

³⁷⁰ Vgl. Kühn (Lebenszyklusorientierte Leistungssysteme im Werkzeugbau), 2016, S. 93-100.

den die Kompetenzen des Werkzeugbaubetriebs analysiert. Dazu werden im ersten Detailschritt B1 Kennzahlen zur Bewertung der Kompetenzen des Werkzeugbaubetriebs in Bezug auf die zuvor identifizierten strategischen Erfolgspositionen definiert und erhoben. Im zweiten Detailschritt B2 schließt sich die Bewertung der Kompetenzen des Werkzeugbaubetriebs auf Basis der erhobenen Kennzahlen an. Im dritten *Schritt C* folgt in Bezug auf die strategische Ausrichtung eine Typisierung des Werkzeugbaubetriebs. Im ersten Detailschritt C1 wird dazu die strategische Ausrichtung des Werkzeugbaubetriebs definiert. Daran anschließend folgt im zweiten Schritt C2 die Typisierung des Werkzeugbaubetriebs. Das abschließende Ergebnis der ersten Schritte A, B und C der Methodik ist der identifizierte Typ des Werkzeugbaubetriebs im Hinblick auf das adressierte Kundennutzenpotenzial. Darauf folgt die Phase der Gestaltung mit den drei Schritten D, E und F. Im vierten *Schritt D* findet die Konfiguration des lebenszyklusorientierten Leistungssystems statt. Dazu werden im Detailschritt D1 die für die Gestaltung relevanten Kunden identifiziert. Im zweiten Detailschritt D2 folgt die Konfiguration des lebenszyklusorientierten Leistungssystems, indem einzelne Leistungsmodule aus dem typspezifischen Leistungsbaukasten durch den Kunden ausgewählt werden. Im fünften *Schritt E* schließt sich die Detaillierung des lebenszyklusorientierten Leistungssystems an. Dazu werden in Detailschritt E1 die Anforderungen des Kunden an die von ihm ausgewählten Leistungsmodule aufgenommen. In Detailschritt E2 folgt die weitere Spezifikation des lebenszyklusorientierten Leistungssystems. Dazu werden Prozessschritte im Sinne von Aktivitäten je Leistungsmodul definiert, die den zuvor identifizierten Kundenanforderungen begegnen können. Der abschließende *Schritt F* beinhaltet die Ausgestaltung des lebenszyklusorientierten Leistungssystems zu einem durchgängigen Leistungssystemprozess. Dazu werden im Detailschritt F1 die einzelnen Leistungsmodule in ein Leistungssystem integriert. Im zweiten Detailschritt F2 folgt die Modellierung eines detaillierten Leistungssystemprozesses über alle Phasen des Werkzeuglebenszyklus. Als abschließendes Ergebnis der Methodik liegt dem durchführenden Werkzeugbaubetrieb ein ausgestalteter Leistungssystemprozess vor. Dieser verknüpft die einzelnen Leistungsmodule zu einem integrierten lebenszyklusorientierten Leistungssystem. Die Basis bildet ein kundenspezifisches Werkzeug, um welches das Leistungssystem gestaltet wird.³⁷¹

Die auf den Betrachtungsbereich bezogenen Anforderungen werden vollumfänglich erfüllt, da der Werkzeugbau ohne Einschränkung über den gesamten Werkzeuglebenszyklus als Betrachtungsbereich für den Ansatz gewählt wird. Die Anforderungen der Kategorie Ganzheitliches Datenmodell werden nicht erfüllt. KÜHN erwähnt in seinem Ansatz verschiedene Dienstleistungen für die Werkzeugnutzungsphase und nennt auch explizit das intelligente Werkzeug ohne jedoch konkret auf Werkzeuglebenszyklusdaten sowie Werkzeuglebenszykluskosten einzugehen. Auch die folgenden Anforderungskategorien Systematische Datenerfassung sowie Datenanalyse und -auswertung werden durch den Ansatz von KÜHN nicht adressiert. Dahingegen werden die Anforderungen in der Kategorie Datenbasierte Anwendungsfälle bezogen auf das Vorgehen vollumfänglich erfüllt. Die Vorgehensbeschreibung der Analyse der Kompetenzen und der Typisierung des Werkzeugbaus in den Methodikschritten B und C sowie

³⁷¹ Vgl. Kühn (Lebenszyklusorientierte Leistungssysteme im Werkzeugbau), 2016, S. 93-100.

die Beschreibung der Konfiguration, der Detaillierung sowie der Ausgestaltung der lebenszyklusorientierten Leistungssysteme in den Methodikschritten D, E und F lassen sich größtenteils auf den Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit übertragen. Nicht betrachtet werden die in den verschiedenen Werkzeuglebenszyklusphasen zur Verfügung stehenden Werkzeuglebenszyklusdaten sowie Werkzeuglebenszykluskosten. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der präsentierte Ansatz nicht zur Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse anwendbar ist. Insbesondere im Bereich der datenbasierten Anwendungsfälle bietet er durch die systematische Vorgehensweise interessante Denkanstöße zur systematischen Anwendungsentwicklung. In Abbildung 45 ist die Bewertung der lebenszyklusorientierten Leistungssysteme im Werkzeugbau nach KÜHN dargestellt.

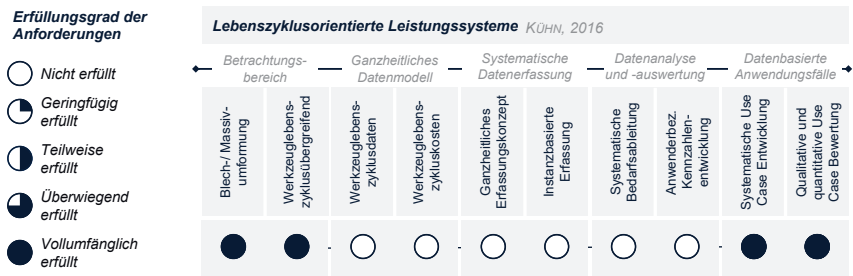


Abbildung 45: Bewertung der Methodik lebenszyklusorientierte Leistungssysteme³⁷²

3.2.3 Internet of Production

SCHUH ET AL. beschreibt in seinem Ansatz eine Vision des Internet of Production als Infrastruktur für Industrie 4.0. Auf dem RWTH Aachen Campus haben Wissenschaftler aus der Produktionstechnik, der Informatik, den Werkstoff- sowie den Wirtschaftswissenschaften gemeinsam die Vision des Internet of Production (IoP) mit der Zielsetzung entwickelt, ein neues Level von domainübergreifender Kollaboration zu erreichen.³⁷³ Dazu werden semantisch korrekte, kontextbewusste Daten nicht nur einmalig, sondern kontinuierlich und hochiterativ in Echtzeit mit der anforderungsgerechten Granularität zentral gespeichert. Die zentrale Speicherung trägt dem Umstand Rechnung, dass in vielen Unternehmen Daten dezentral in unterschiedlichen Systemen gespeichert und nicht zentral abgerufen werden können.³⁷⁴ Mit Hilfe des IoP soll eine Dateninfrastruktur für die domainübergreifende Verknüpfung aller relevanten Systeme geschaffen werden, die entlang des gesamten Produktlebenszyklus genutzt werden kann.³⁷⁵ In Abbildung 46 ist Internet of Production als Dateninfrastruktur für Industrie 4.0 abgebildet.

³⁷² Eigene Darstellung
³⁷³ Vgl. Schuh et al. (Engineering valley - Internet of production auf dem RWTH Aachen Campus), 2017.
³⁷⁴ Vgl. Schuh et al. (Industrie 4.0: Agile Entwicklung und Produktion im Internet of Production), 2020, S. 469.
³⁷⁵ Vgl. Schuh et al. (Internet of Production: Rethinking production management), 2019, S. 535-537.

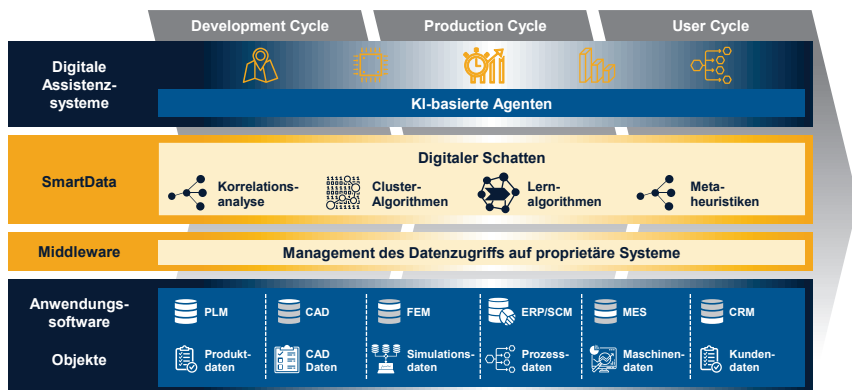


Abbildung 46: Das IoP als Dateninfrastruktur für Industrie 4.0³⁷⁶

Entlang des Produktlebenszyklus werden die drei Betrachtungsbereiche Development Cycle, Production Cycle und User Cycle unterschieden. Vertikal werden die Schichten Anwendungssoftware mit den dazugehörigen Objekten, Middleware, Smart Data und Assistenzsysteme unterteilt. Die genannten vertikalen Schichten zeichnen sich durch eine unterschiedliche Datengranularität aus. In der untersten Schicht werden verschiedene Anwendungssoftwares vorgestellt. Die Datensätze dieser Systeme variieren stark in Bezug auf Vollständigkeit, Genauigkeit, Semantik und Granularität. Als Basis für eine systemübergreifende Analyse dient die Middleware, die die Daten zunächst filtert und verknüpft. Die gefilterten und verknüpften Daten werden nach Bedarf und Relevanz durch unterschiedliche Algorithmen zu Smart Data aufbereitet. In der Smart Data Ebene wird die Bereitstellung eines Digitalen Schattens anvisiert, der ein echtzeitfähiges Abbild der relevanten Zusammenhänge produktionstechnischer Prozesse ist. Zur Identifikation von Optimierungspotenzialen und Verifikation von Hypothesen werden auf Basis des Digitalen Schattens historische und echtzeitfähige Analysen durchgeführt. Mithilfe des ganzheitlich geschaffenen Systemverständnisses können Handlungsbedarfe proaktiv und schnell erkannt sowie die Konsequenzen unterschiedlicher Handlungsoptionen dargestellt werden. In der obersten Ebene unterstützen Digitale Assistenzsysteme den Anwendenden im Entscheidungsprozess, indem sie die teils hohe Komplexität der Smart Data verarbeiten. Dazu wird die Komplexität für den Anwendenden anforderungsgerecht auf das Wesentliche reduziert und anschließend adressatengerecht präsentiert, z. B. in intuitiv zu bedienenden Apps. Mithilfe des beschriebenen Internet of Production Ansatzes nach SCHUH ET AL. wird eine Produktivitätssteigerung durch die Vernetzung der Betrachtungsbereiche Development Cycle, Production Cycle und User Cycle erreicht.³⁷⁷

Die Anforderungsdimension Betrachtungsbereich wird durch den Ansatz nach SCHUH ET AL. teilweise erfüllt. Der Ansatz wurde für die Serienproduktion entwickelt und erfüllt entsprechend

³⁷⁶ Vgl. Schuh et al. (Industrie 4.0: Agile Entwicklung und Produktion im Internet of Production), 2020, S. 470.

³⁷⁷ Vgl. Schuh et al. (Industrie 4.0: Agile Entwicklung und Produktion im Internet of Production), 2020, S. 470-471.; Vgl. Schuh et al. (Internet of Production: Rethinking production management), 2019, S. 537.; Vgl. Schuh et al. (Engineering valley - Internet of production auf dem RWTH Aachen Campus), 2017, S. 5.

nicht die Anforderungen der Einzel- und Kleinserienfertigung. Dahingegen wird die Anforderung Werkzeuglebenszyklusübergreifende Betrachtung überwiegend erfüllt. Der vorgestellte Ansatz deckt mit den drei vorgestellten Betrachtungsbereichen Development Cycle, Production Cycle und User Cycle fast den gesamten Lebenszyklus eines Produktes ab. Lediglich die Phase der Ausmusterung und werkzeugspezifische Besonderheiten werden nicht aufgegriffen. Die Anforderungskategorie Ganzheitliches Datenmodell wird geringfügig erfüllt. Es werden lediglich übergeordnet die relevanten Systeme und Daten über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes zur Nachverfolgung der Kosten und des Produkteinsatzes genannt, jedoch wird nicht auf die einzelnen Datenkategorien, die Betriebsumgebung sowie die einzelnen Kostenelemente und Kostenpositionen eingegangen. Auf die Besonderheiten von Werkzeugen sowie die Verknüpfung von Werkzeugdaten mit den Produktdaten während der Serienproduktion wird dabei nicht eingegangen. Die Systematik ist aber grundsätzlich übertragbar. Der Ansatz wird entsprechend wie ein Ansatz für den Werkzeugbau bewertet. Die Anforderungsdimension Systematische Datenerfassung wird überwiegend erfüllt. Grundsätzlich wird ein ganzheitliches Konzept zur lebenszyklusübergreifenden Datenaufnahme inklusive Konzept für die anschließende Datenaufbereitung vorgestellt, wobei die Ausmusterungsphase nicht berücksichtigt wird und auf die Spezifika des Anwendungsfall Werkzeugbau nicht eingegangen wird. Da das Vorgehen grundsätzlich auf den Werkzeugbau übertragen werden kann, wird der Ansatz wie ein werkzeugbauspezifischer Ansatz bewertet. Die instanzbasierte Erfassung wird vorausgesetzt aber nicht explizit genannt oder weiter ausgeführt. Die Kategorien Datenanalyse- und -auswertung und Datenbasierte Anwendungsfälle werden nicht erfüllt. Zwar werden die Themen Datenanalyse und Use Cases in den vertikalen Ebenen Smart Data und Digitale Assistenzsysteme erwähnt, aber nicht im Kontext des Werkzeugbaus vorgestellt sowie keine konkrete Vorgehensweise zur Entwicklung und Umsetzung gegeben. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der präsentierte Ansatz nicht zur Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse anwendbar ist. Insbesondere im Bereich des Ganzheitlichen Datenmodells sowie des Ganzheitlichen Erfassungskonzepts bietet der Ansatz teilweise interessante Denkanstöße. In Abbildung 47 ist die Bewertung des Internet of Production Ansatzes nach SCHUH ET AL. dargestellt.

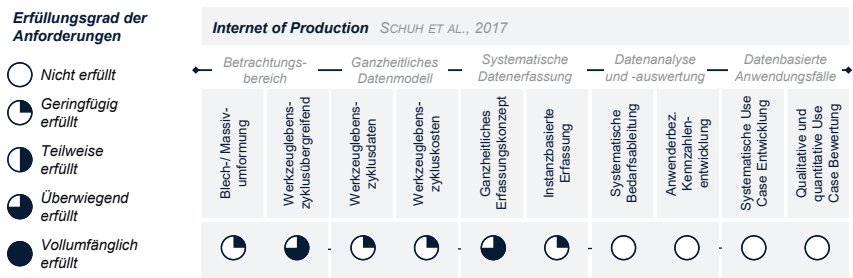


Abbildung 47: Bewertung des Ansatzes Internet of Production³⁷⁸

³⁷⁸ Eigene Darstellung

3.2.4 Total Tool Cost of Ownership Indicator within the Cutting Tool Life Cycle

BRENNER ET AL. beschreibt in seinem Ansatz eine lebenszyklusübergreifende Berechnungslogik für Zerspanungswerkzeuge. Neben werkzeugrelevanten Kostenparametern werden auch Leistungsparameter einzelner Zerspanungswerkzeuginstanzen sowie der Einfluss von Langzeitmaßnahmen bei der Berechnung der Total Cost of Ownership berücksichtigt. Darüber hinaus präsentiert BRENNER ET AL. in seinem Ansatz eine IT-Architektur für die Datensammlung, -berechnung und -analyse von Werkzeuglebenszykluskosten von Zerspanungswerkzeugen. Das Werkzeuglebenszykluskostenmodell für Zerspanungswerkzeuge nach BRENNER ET AL. zeichnet sich dadurch aus, dass die vorgelagerten Phasen Werkzeugkonzept, Werkzeugkonstruktion, Arbeitsplanung, Werkzeugfertigung, Werkzeugtest und die nachgelagerte Phase Werkzeugrecycling zusätzlich berücksichtigt werden. Über den gesamten Werkzeuglebenszyklus werden für eine Instanz eines Zerspanungswerkzeugs alle relevanten Kosten aufgenommen, um somit die Total Tool Cost of Ownership aus der Perspektive der Serienproduktion, die das Werkzeug einkauft, nutzt, instandsetzt und recycelt, bewerten zu können. BRENNER ET AL. geht detailliert auf die einzelnen Kostenfunktionen in den verschiedenen Lebensphasen ein und zeigt Korrelationen zwischen den unterschiedlichen Kostenparametern auf. Das Ergebnis ist der Total Tool Cost of Ownership (TTCO) Indikator, der 87 statistische Performance-, Kosten- und Qualitätsparameter berücksichtigt. Im zweiten Teil seines Ansatzes stellt BRENNER ET AL. die notwendige IT-Architektur vor, die zur Umsetzung des TTCO-Modells notwendig ist. Diese dient als Basis für die Aggregation aller Werkzeuglebenszyklusdaten in einem Data Warehouse. Darauf aufbauend soll das Tool Knowledge Management System (KMS) eine Hauptfunktion sowie drei Unterfunktionen enthalten. Die Hauptfunktion ist die Berechnung der Werkzeugkosten je Werkzeuginstanz über den gesamten Werkzeuglebenszyklus. Die erste Nebenfunktion dient der Nachverfolgung von Verbesserungsmaßnahmen, die in organisatorische sowie technische Verbesserungsmaßnahmen unterteilt werden können, inklusive direkter Verlinkung zu den erzielten Einsparungen bei den Werkzeugkosten. Die zweite Nebenfunktion dient der Analyse der Entwicklung der Werkzeuglebenszykluskosten für eine Instanz, um die Effektivität einzelner Maßnahmen beurteilen zu können. Die dritte Unterfunktion dient der Benachrichtigung von unterschiedlichen User Gruppen im Falle von relevanten Änderungen bei den Werkzeuglebenszykluskosten bezogen auf eine Werkzeuginstanz. In Abbildung 48 ist die IT-Architektur nach BRENNER ET AL. abgebildet.³⁷⁹

³⁷⁹ Vgl. Brenner et al. (Total Tool Cost of Ownership Indicator), 2018, S. 1406-1408.

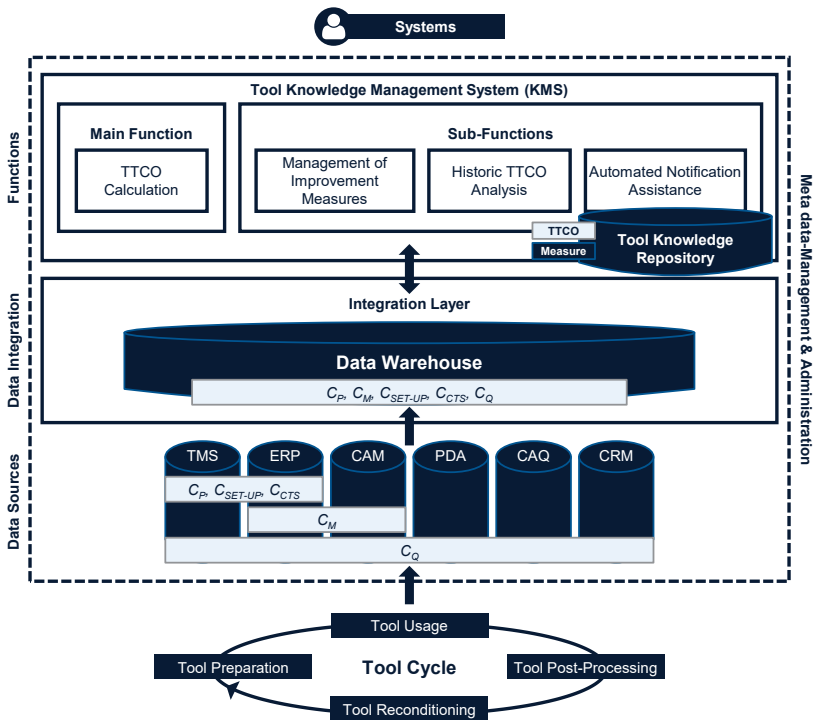


Abbildung 48: Darstellung der IT-Architektur³⁸⁰

Die erste Bewertungskategorie Betrachtungsbereich wird geringfügig bis vollständig erfüllt. Es handelt es sich um einen Ansatz, der auf Zerspanungswerkzeuge fokussiert ist und damit lediglich den Anforderungen der Serienproduktion nicht aber den Anforderungen der Einzel- und Kleinserienfertigung gerecht wird. Der Ansatz deckt alle Phasen des Werkzeuglebenszyklus ab und erfüllt diese Anforderung entsprechend vollständig. Die Kategorie Ganzheitliches Datenmodell ist teilweise erfüllt. Während die Unterkategorie Werkzeuglebenszykluskosten vollumfänglich erfüllt ist mit der Einschränkung, dass hier lediglich Zerspanungswerkzeuge betrachtet werden, wird die Kategorie Werkzeuglebenszyklusdaten gar nicht erfüllt. Die Autoren weisen zwar grundsätzlich auf Werkzeuglebenszyklusdaten hin, die einen Einfluss auf die Werkzeuglebenszykluskosten haben können, beschränken sich jedoch ausschließlich auf ausgewählte Beispiele während der Werkzeugnutzungsphase. Die Kategorie Systematische Datenerfassung wird teilweise erfüllt. Das Erfassungskonzept bezieht sich bis auf wenige Ausnahmen ausschließlich auf die Phase der Werkzeugnutzung und wird in dieser Phase auch nur in Teilen erläutert. Grundsätzlich erwähnen die Autoren die Erfassung je Instanz eines Zerspanungswerkzeugs während der Werkzeugnutzung, erläutern jedoch nicht die technische

³⁸⁰ Vgl. Brenner et al. (Total Tool Cost of Ownership Indicator), 2018, S. 1408.

Umsetzung. Die Kategorie Datenanalyse und -auswertung wird nur geringfügig erfüllt. Es werden Kennzahlen bezogen auf die Werkzeuglebenszykluskosten mit Fokus auf die Werkzeugnutzungsphase erwähnt. Die Systematische Bedarfsableitung wird kurz angeführt. Eine darüberhinausgehende Datenanalyse und -auswertung wird nicht beschrieben. Die Kategorie Datenbasierte Anwendungsfälle wird gar nicht erfüllt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der präsentierte Ansatz nicht zur Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse anwendbar ist. Insbesondere im Bereich der Werkzeuglebenszykluskosten sowie der instanzbasierten Erfassung bietet er teilweise interessante Denkanstöße. In Abbildung 49 ist die Bewertung des Total Cost of Ownership Indicator within the Cutting Tool Life Cycle nach BRENNER ET AL. dargestellt.

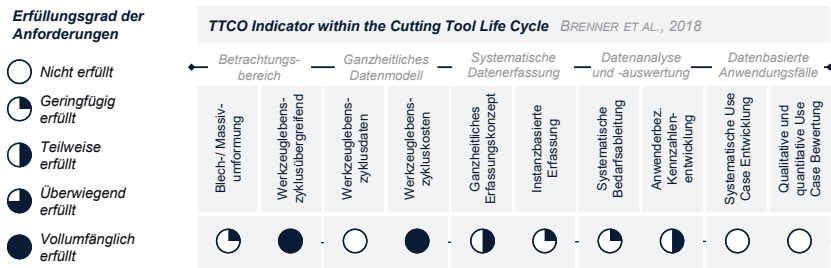


Abbildung 49: Bewertung TCO Indicator within the Cutting Tool Life Cycle³⁸¹

3.2.5 Data Driven Die Casting Smart Factory Solution

ZHAO ET AL. verfolgen mit Ihrem Ansatz das Ziel, ein datengetriebenes Konzept für eine intelligente Druckgussfertigung vorzustellen. Die Schlüsseltechnologie der smarten Druckgussfabrik ist die datenbasierte Optimierung der Produktion. Dazu wird ein dreischichtiges cyber-physisches System entwickelt, das den Wert der gesammelten Produktionsdaten nutzt und damit eine effiziente Produktion von Druckgussformen unterstützt.³⁸² In der nachfolgenden Abbildung 50 ist die Grundidee nach ZHAO ET AL. für die datengetriebene Smart Factory abgebildet.

³⁸¹ Eigene Darstellung

³⁸² Vgl. Zhao et al. (Data Driven Die Casting Smart Factory Solution), 2018, S. 13.

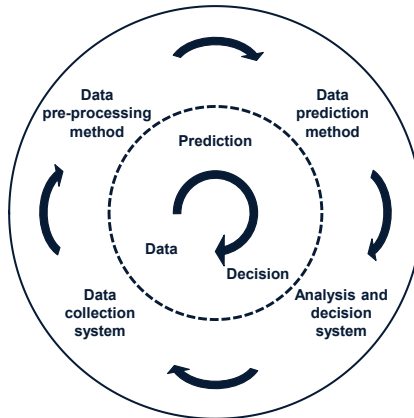


Abbildung 50: Grundidee der datengetriebenen Smart Factory für die Druckgussfertigung³⁸³

Während in der Vergangenheit häufig zunächst die Kausalität eines Problems identifiziert und daraufhin problembezogenen Daten gesammelt und ausgewertet wurden, verfolgen ZHAO ET AL. einen neuen Ansatz. Der Ansatz sieht vor, dass alle Produktionsdaten in der Smart Factory gesammelt, gereinigt, klassifiziert, analysiert und auf Kausalität untersucht werden, um den Leistungsindex der Fabrik zu bestimmen und eine Entscheidungshilfe für weitere Optimierungen zu bieten. Dem Ansatz nach ZHAO ET AL. liegt die Annahme zugrunde, dass eine ausreichende Datenmenge die Effektivität einer Datenanalyse garantiert, auch wenn die kausalen Zusammenhänge vorher nicht bekannt sind. Dieses Konzept wird im nächsten Schritt auf das Druckgießen angewendet.³⁸⁴ Das Backbone der Smart Factory für das Druckgießen bildet die umfangreiche Datensammlung über den gesamten Produktionsprozess. Dabei wird die Druckgießanlage, das Transportsystem für das flüssige Aluminium, das intelligente Logistiksystem sowie weitere intelligente cyber-physische Systeme vernetzt und die Informationen zusammengeführt. Für die intelligente Druckgießanlage werden beispielhaft der Gießdruck, die Pressgeschwindigkeit sowie die Temperatur des flüssigen Aluminiums erfasst. Im zweiten Schritt werden die erfassten Informationen im so genannten „information layer“ der Smart Factory aggregiert und vorverarbeitet. Insbesondere die sichere Identifikation von fehlerhaften oder fehlenden Angaben ist ein entscheidender Faktor für zuverlässige und robuste Analyseergebnisse. Dazu werden unterschiedliche Plausibilitätsprüfungen der Daten durchgeführt und notfalls fehlende Daten interpoliert. In einem weiteren Schritt werden die vorverarbeiteten Daten genutzt, um ein Vorhersagemodell für die Druckgussformenqualität zu entwickeln.³⁸⁵ Das Model zur Vorhersage der Qualität der Druckgussproduktion auf der Grundlage eines neuronalen Netzes ist in der nachfolgenden Abbildung 51 dargestellt.

³⁸³ Vgl. Zhao et al. (Data Driven Die Casting Smart Factory Solution), 2018, S. 15.

³⁸⁴ Vgl. Zhao et al. (Data Driven Die Casting Smart Factory Solution), 2018, S. 14-16.

³⁸⁵ Vgl. Zhao et al. (Data Driven Die Casting Smart Factory Solution), 2018, S. 17-18.

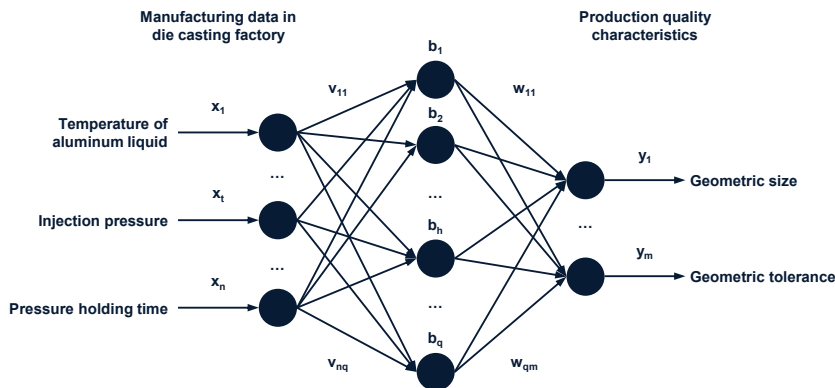


Abbildung 51: Modell zur Vorhersage der Qualität der Druckgussproduktion³⁸⁶

Mithilfe dieses Modells auf Basis eines neuronalen Netzwerks soll die Produktionsqualität in einer intelligenten Druckgussfertigung echtzeitnah vorhergesagt werden können. Im letzten Schritt werden die Analyseergebnisse in das sogenannte „decision layer“ übermittelt und dienen als Entscheidungshilfe bei der Optimierung der Produktionseffizienz der smarten Druckgussfertigung.³⁸⁷ Das Konzept der Druckguss Smart Factory nach ZHAO ET AL. ist in der nachfolgenden Abbildung 52 dargestellt.

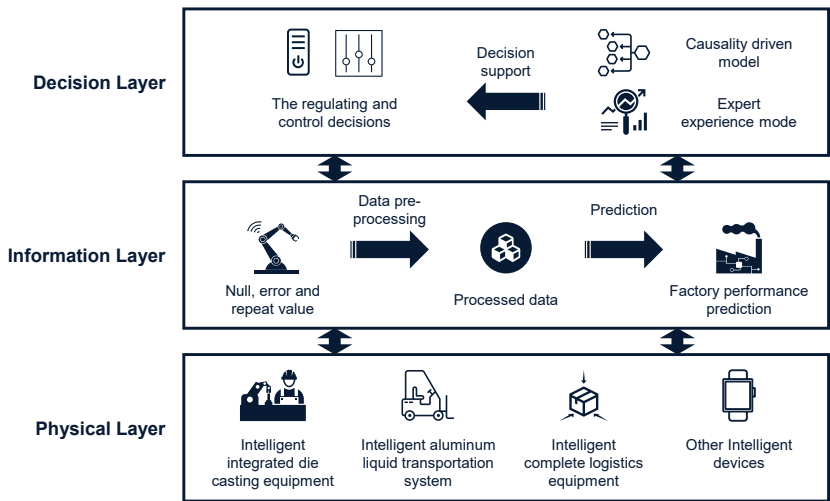


Abbildung 52: Konzept der Druckguss Smart Factory³⁸⁸

³⁸⁶ Vgl. Zhao et al. (Data Driven Die Casting Smart Factory Solution), 2018, S. 18.

³⁸⁷ Vgl. Zhao et al. (Data Driven Die Casting Smart Factory Solution), 2018, S. 19-20.

³⁸⁸ Vgl. Zhao et al. (Data Driven Die Casting Smart Factory Solution), 2018, S. 20.

Zusammengefasst haben ZHAO ET AL. einen Ansatz für eine intelligente Druckgussfertigung auf Basis cyber-physischer-Systeme vorgestellt. Ihr Ansatz gliedert sich dabei in die drei Ebenen Physical Layer für die Datensammlung, Information Layer für die Aggregation, Vorverarbeitung und Auswertung der Daten sowie den Decision Layer für die Entscheidungsunterstützung. Die drei Ebenen sind als close loop aufgebaut und stellen einen durchgängigen Informationsfluss sicher. Im nächsten Schritt planen ZHAO ET AL. die Detaillierung und Umsetzung der vorgestellten Ebenen.³⁸⁹

Die Bewertungskategorie Betrachtungsbereich wird überwiegend erfüllt. Der vorgestellte Ansatz nach ZHAO ET AL. ist grundsätzlich für die Branche Werkzeugbau mit Fokus auf den Druckguss erstellt worden. Der Fokus liegt jedoch hauptsächlich auf dem übergeordneten Serienproduktionsprozess und weniger auf der Betrachtung des Werkzeugs über den gesamten Lebenszyklus. Die Anforderung Werkzeuglebenszyklusübergreifende Betrachtung wird entsprechend teilweise erfüllt. Auch die Bewertungsdimension Ganzheitliches Datenmodell ist teilweise erfüllt. Zwar stellen ZHAO ET AL. einen Smart Factory Ansatz für die Druckgussproduktion vor und nennen konkrete werkzeugspezifische Parameter sowie zu berücksichtigende Parameter der Betriebsumgebung, die zu überwachen sind, der Fokus liegt dabei jedoch hauptsächlich auf der Werkzeugnutzungsphase. Auf das Thema Werkzeugkosten wird im vorgestellten Ansatz gar nicht eingegangen. Die Kategorie Systematische Datenerfassung wird teilweise erfüllt. ZHAO ET AL. stellen einen ganzheitlichen Ansatz für eine intelligente Druckgussfertigung auf Basis cyber-physischer-Systeme in drei Ebenen vor und erläutern konzeptionell die Sammlung, die Aggregation, das Pre-Processing und die Auswertung der Daten mit Fokus auf die Werkzeugnutzungsphase. Das Druckgusswerkzeug wird dabei nur als Einheit und nicht auf Komponentenebene betrachtet. Auf die instanzbasierte Erfassung wird nur indirekt eingegangen, indem zum Beispiel einzelne Transportsysteme über einen RFID-Chip verfügen sollen und CPS grundsätzlich über eine eigene ID verfügen. Inwiefern dies auf die einzelnen Komponenten des Druckgusswerkzeugs zutrifft, geht aus dem vorgestellten Ansatz jedoch nicht hervor. Die Anforderung Instanzbasierte Datenerfassung wird entsprechend nur geringfügig erfüllt. Auch die Kategorie Datenanalyse und -auswertung ist nur geringfügig erfüllt. Für die Bedarfsermittlung liegt ZHAO ET AL. die Annahme zugrunde, dass eine ausreichende Datenmenge die Effektivität einer Datenanalyse garantiert, auch wenn die kausalen Zusammenhänge vorher nicht bekannt sind. Diese Behauptung bleibt jedoch für den gezeigten Use Case der Druckgussfertigung ohne Beweis. Die Autoren verweisen in diesem Zusammenhang auf die Kennzahl Leistungsindex der Fabrik, die die zentrale zu optimierende Größe darstellt. Offen bleibt dabei, wie sich der Leistungsindex der Fabrik im Detail zusammensetzt. Darüber hinaus gehen die Autoren nicht darauf ein, wie eine Leistungskennzahl für das Druckgusswerkzeug ausgestaltet werden könnte. Die Anforderungskategorie Datenbasierte Anwendungsfälle wird nicht erfüllt. Die Autoren stellen in diesem Paper zunächst nur Ihren übergeordneten Ansatz vor, die weitere Detaillierung soll später folgen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der präsentierte Ansatz nicht zur Gestaltung der datenbasierten Werkzeugele-

³⁸⁹ Vgl. Zhao et al. (Data Driven Die Casting Smart Factory Solution), 2018, S. 20.

benszykluskostenanalyse anwendbar ist. Insbesondere in dem Bereich Systematische Datenerfassung bietet er teilweise interessante Denkanstöße. In Abbildung 53 ist die Bewertung des Data Driven Die Casting Smart Factory Solution nach ZHAO ET AL. dargestellt.

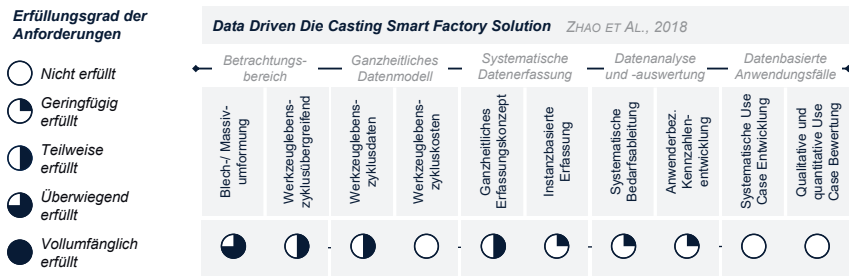


Abbildung 53: Bewertung Data Driven Die Casting Smart Factory Solution³⁹⁰

3.2.6 Digital Twin of a Cutting Tool

BOTKINA ET AL. beschreiben in ihrem Ansatz einen Digitalen Zwilling für ein Zerspanungswerkzeug. Vorgestellt werden ein mögliches Datenformat, eine Datenstruktur sowie Informationsflüsse und das Datenmanagement. Darüber hinaus werden darauf aufbauende Applikationen und Datenanalysen beschrieben. Die Daten werden über den gesamten Werkzeuglebenszyklus nach ISO 13399, basierend auf der event-driven line information system architecture (LISA) with IoT functionality, erhoben. Der Digitale Zwilling soll langfristig genutzt werden, um das Handling von Zerspanungswerkzeugen in der Serienproduktion zu optimieren.³⁹¹ In der nachfolgenden Abbildung 54 sind die Werkzeugtypen und Zusammenbaustufen dargestellt.

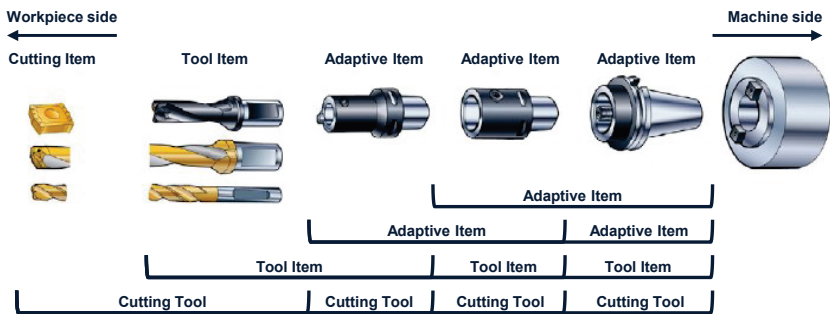


Abbildung 54: Unterschiedliche Werkzeugtypen und Zusammenbauten³⁹²

³⁹⁰ Eigene Darstellung

³⁹¹ Vgl. Botkina et al. (Digital Twin of a Cutting Tool), 2018, S. 215.

³⁹² Vgl. Botkina et al. (Digital Twin of a Cutting Tool), 2018, S. 216.

ISO 13399 ist der aktuell gültige Standard für den Informationsaustausch zwischen verschiedenen Softwaresystemen zur Unterstützung von Zerspanungswerkzeugen und Werkzeughaltern sowie für den Informationsaustausch von Werkzeugdaten zwischen Hersteller, Verkäufer und Anwender. Die ISO Norm 13399 sieht die folgenden Informationen für den übergreifenden Austausch in der Datenstruktur vor: Werkzeug, Werkzeugzusammenbau, Referenz zu externen Dokumenten sowie nominale und physische Werkzeuge. Für das Werkzeug wird die Version, die Definition, die Maße und Korrelationen zwischen verschiedenen Werkzeugen gespeichert. Für den Werkzeugzusammenbau werden die Definition, die Maße, Zusammenbauinstruktionen sowie ergänzende 3D-Modell-Daten erfasst. Unter Referenzen zu externen Dokumenten werden das 3D-Modell für das Werkzeug oder den Werkzeugzusammenbau gespeichert. Zu den nominalen Werkzeugen sowie zum physischen Werkzeug werden Informationen zum CAM-Programm abgespeichert. Die Datenstruktur für das Werkzeug und den Werkzeugzusammenbau ist in vier Kategorien unterteilt. Unter dem Schnittlelement werden alle Informationen zu Einsätzen und Köpfen von Vollmaterialwerkzeugen gespeichert. In die Kategorie Werkzeug fallen Informationen zum Werkzeughalter und zum Schnittlelement. Zu dem Element adaptives Teil zählen Informationen zu Adaptern. Zur letzten Kategorie Zusammenbauteile zählen Informationen zu kleinen Bauteilen wie Schrauben, die für den Zusammenbau benötigt werden. Die vorgestellte Datenstruktur sieht dabei die Erfassung der Informationen auf Instanzebene vor. Die vorgestellte ISO 13399 findet bereits Anwendung in der Software ToolMaker, die von Sandvik Coromant initial entwickelt und aktuell durch das KTH Royal Institute of Technology um weitere Module und Funktionen erweitert wird. Dazu zählt unter anderem die line information system architecture (LISA), die entwickelt wurde, um einen Informationsaustausch zwischen Equipment unterschiedlicher Hersteller, unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Entwicklungsstufen zu ermöglichen. LISA ist eine eventbasierte, serviceorientierte Architektur (SOA), die es individuellen Applikationen ermöglicht, sich selbst als Services zu rendern und somit mit anderen Applikationen zu interagieren. LISA resultiert in einer Architektur, die Applikationen verbindet und dabei eine flexible Nachrichtenstruktur bietet. Die zentralen Elemente von LISA sind Nachrichtenformate, Kommunikations- und Serviceendpoints sowie ein Nachrichtenbus.³⁹³ In der nachfolgenden Abbildung 55 ist der Digitale Zwilling für ein Zerspanungswerkzeug dargestellt.

³⁹³ Vgl. Botkina et al. (Digital Twin of a Cutting Tool), 2018, S. 216-217.

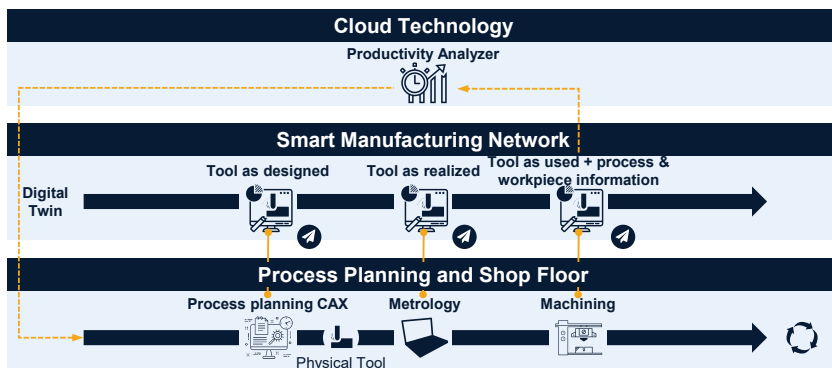


Abbildung 55: Digitaler Zwilling eines Zerspanungswerkzeugs³⁹⁴

Kommunikationen zwischen der Produktionslinie und anderen möglichen Informationskunden werden mithilfe von detaillierten und spezifischen Nachrichten, Tweets genannt, umgesetzt. Über die gesamte Werkzeugnutzungsphase können so Informationen zwischen den verschiedenen Systemen ausgetauscht werden. Zusammengefasst kann der in diesem Paper beschriebene Digitale Zwilling von Zerspanungswerkzeugen dazu dienen, Informationen standardisiert zu speichern und applikationsübergreifend auszutauschen. Über den Nutzungszyklus wird der Digitale Zwilling kontinuierlich mit echtzeitfähigen Informationen angereichert und dient damit langfristig als Basis für die Datenanalyse zur Optimierung des Werkzeugeinsatzes.³⁹⁵

Die Kategorie Betrachtungsbereich wird geringfügig bis teilweise erfüllt. Der Ansatz ist explizit für Zerspanungswerkzeuge anzuwenden, die als Serienprodukt hergestellt werden und auch in ihrem Einsatz in der Serienproduktion nur bedingt mit Blech- und Massivumformwerkzeugen verglichen werden können. Die Anforderung Blech- und Massivumformwerkzeuge wird entsprechend nur geringfügig erfüllt. Die Schnittstelle zur Serienfertigung ist grundsätzlich durch die vorgestellte Datenstruktur und die LISA-Architektur gewährleistet, wobei jedoch die Phase der Werkzeugbereitstellung von diesem Ansatz gar nicht betrachtet wird. Die Anforderung Werkzeuglebenszyklusübergreifende Betrachtung wird entsprechend nur teilweise erfüllt. Die Bewertungskategorie Ganzheitliches Datenmodell wird geringfügig erfüllt. Der Ansatz von BOTINKA ET AL. sieht die ganzheitliche Vernetzung vor, geht aber nicht detailliert auf die notwendigen zu vernetzenden Daten- und Kostenarten ein. Die Anforderung Erfassung der Werkzeuglebenszyklusdaten wird nur geringfügig erfüllt. Das Thema Werkzeugkosten wird nur indirekt durch den möglichen Use Case der Werkzeugstandzeitoptimierung angesprochen. Die Anforderung Erfassung der Werkzeuglebenszykluskosten wird entsprechend nicht erfüllt. Die Kategorie Systematische Datenerfassung wird teilweise erfüllt. Die Autoren stellen für die Phase der Werkzeugnutzung ein ganzheitliches Erfassungskonzept inklusive Handlungsempfehlungen für eine fehlerminimierende und verfälschungssichere Erfassung vor und erwähnen

³⁹⁴ Vgl. Botkina et al. (Digital Twin of a Cutting Tool), 2018, S. 217.

³⁹⁵ Vgl. Botkina et al. (Digital Twin of a Cutting Tool), 2018, S. 216-218.

explizit die Erfassung auf Instanzebene inklusive der Berücksichtigung einer anforderungsge- rechten Datenqualität bei der Beschreibung der Datenstruktur. Die Kategorie Datenanalyse und -auswertung wird nicht erfüllt, da die Autoren zwar datenbasierte Use Cases nennen, nicht aber auf die systematische Bedarfsableitung sowie die anwenderbezogene Kennzahlenent- wicklung eingehen. Die Anforderungskategorie Datenbasierte Anwendungsfälle wird nicht er- füllt. Die Autoren führen zwar verschiedene Use Cases an, gehen aber nicht auf die Identifika- tion, Entwicklung oder Bewertung ein. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der prä- sentierte Ansatz nicht zur Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenana- lyse anwendbar ist. Insbesondere im Bereich der systematischen Datenerfassung bietet er teilweise interessante Denkanstöße. In Abbildung 56 ist die Bewertung des Ansatzes zum Di- gitalen Schatten eines Zerspanungswerkzeugs nach BOTINKA ET AL. dargestellt.

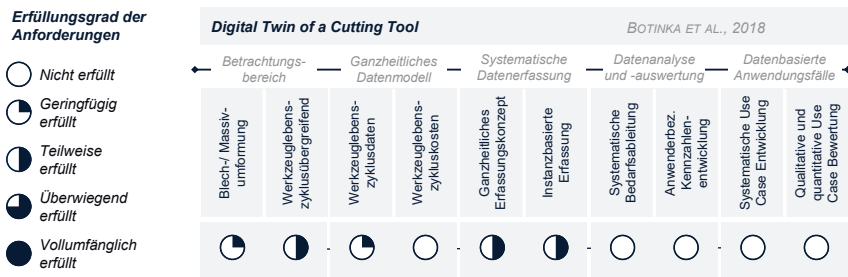


Abbildung 56: Bewertung Digital Twin of a Cutting Tool³⁹⁶

3.2.7 Datenbasiertes Wissensmanagement im Werkzeugbau

Die übergeordnete Zielsetzung der Arbeit von BEGOVIC ist die Entwicklung eines Modells zur Gestaltung des datenbasierten Wissensmanagements im Werkzeugbau. Dieses Modell soll Werkzeugbaubetrieben eine strategische Neupositionierung durch die Fokussierung des Leistungsportfolios auf Smart Services ermöglichen. Der Ansatz von BEGOVIC beschreibt sowohl das Smart Service Portfolio als auch die zur Entwicklung von Smart Services notwendige Wert- schöpfung.³⁹⁷ Der Aufbau des Gestaltungsmodells ist in Abbildung 57 dargestellt.

³⁹⁶ Eigene Darstellung

³⁹⁷ Vgl. Begovic (Datenbasiertes Wissensmanagement für Smart Services im Werkzeugbau), 2017, S. 4.

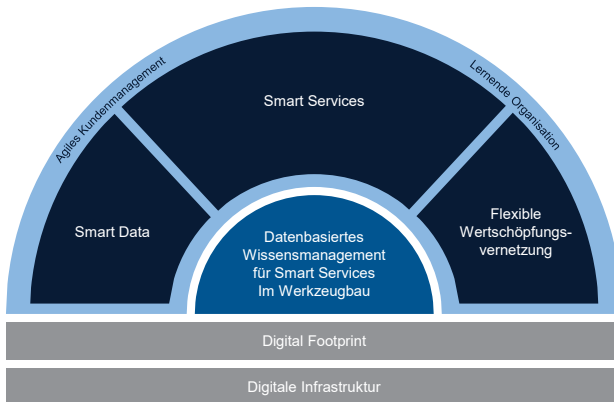


Abbildung 57: Gestaltungsmodell für das Datenbasierte Wissensmanagement³⁹⁸

Die Grundlage des Gestaltungsmodells nach BEGOVIC bilden die beiden Felder Digitale Infrastruktur und Digital Footprint. Sie ermöglichen die Entstehung, die Aufnahme, die Speicherung und die Verwertung von Daten im Lebenszyklus eines Werkzeugs und schaffen die Voraussetzungen zur Gestaltung des datenbasierten Wissensmanagements im Werkzeugbau.³⁹⁹ Im Feld Digitale Infrastruktur werden die Voraussetzungen zur Übertragung, Speicherung und Verarbeitung von Daten aus dem Digital Footprint vorgestellt und eine Vorgehensweise zur Implementierung dieser Elemente im Werkzeugbau beschrieben.⁴⁰⁰ Im Feld Digital Footprint wird der Digitale Schatten eines Werkzeugs definiert sowie die relevanten Elemente und eine Vorgehensweise zur Abbildung der digitalen Identität eines Werkzeugs im gesamten Lebenszyklus beschrieben.⁴⁰¹ Auf die Grundlage des Gestaltungsmodells nach BEGOVIC mit den beiden Feldern Digitale Infrastruktur und Digital Footprint folgen die beiden befähigenden Gestaltungsfelder Lernende Organisation und Agiles Kundenmanagement, die die Gestaltung eines datenbasierten Wissensmanagements im Werkzeugbau zwar nicht bedingen, aber maßgeblich unterstützen. Im befähigenden Element der Lernenden Organisation werden Elemente beschrieben, die zur Transformation der Unternehmensorganisationsstruktur hin zu einer lernenden Organisation notwendig sind. Bezogen auf den Werkzeugbau wird dazu die systematische Integration von Wissen in die Wertschöpfungsgestaltung sowie die Weiterentwicklung bestehenden Wissens erläutert. Im zweiten befähigenden Element Agiles Kundenmanagement werden Elemente beschrieben, die es dem Werkzeugbau ermöglichen, die eigene Wertschöpfung konsequent an den Bedürfnissen der Kunden auszurichten und flexibel an sich ändernde Rahmenbedingungen anzupassen.⁴⁰² Die zentralen Elemente des Gestaltungsmodells bilden die drei Gestaltungsfelder Smart Data, flexible Wertschöpfungs- vernetzung sowie Smart

³⁹⁸ Vgl. Begovic (Datenbasiertes Wissensmanagement für Smart Services im Werkzeugbau), 2017, S. 134.

³⁹⁹ Vgl. Begovic (Datenbasiertes Wissensmanagement für Smart Services im Werkzeugbau), 2017, S. 134.

⁴⁰⁰ Vgl. Begovic (Datenbasiertes Wissensmanagement für Smart Services im Werkzeugbau), 2017, S. 126.

⁴⁰¹ Vgl. Begovic (Datenbasiertes Wissensmanagement für Smart Services im Werkzeugbau), 2017, S. 127.

⁴⁰² Vgl. Begovic (Datenbasiertes Wissensmanagement für Smart Services im Werkzeugbau), 2017, S. 128-130.

Services, die zur Gestaltung des Datenbasierten Wissensmanagements im Werkzeugbau notwendig sind. Das Gestaltungsfeld Smart Data kategorisiert Daten und beschreibt in Abhängigkeit der Datenstrukturen Aktivitäten, deren Verknüpfung und Durchführung die Generierung von Smart Data ermöglicht. Im Gestaltungsfeld Flexible Wertschöpfungsvernetzung wird die Implementierung von Prozessen, Ressourcen und Fähigkeiten sowie die notwendige Kollaboration mit Wertschöpfungspartnern zur Gestaltung einer auf Smart Services fokussierten Leistungserstellung beschrieben. Das dritte Gestaltungsfeld Smart Services umfasst alle auszuführenden Aktivitäten, deren Umsetzung zur Erreichung eines nachhaltigen Kundennutzens sowie einer Umsatzsteigerung im Werkzeugbau durch die Erweiterung des Leistungsportfolios um Smart Services führt.⁴⁰³ Zusammengefasst beschreibt das Gestaltungsmodell nach BEGOVIC ganzheitlich die Gestaltung des Datenbasierten Wissensmanagements im Werkzeugbau durch die Berücksichtigung des auf Smart Services fokussierten Leistungsportfolios sowie die Beschreibung der dazu notwendigen Ressourcen und Fähigkeiten in der Wertschöpfungsgestaltung.⁴⁰⁴

Die auf den Betrachtungsbereich bezogenen Anforderungen werden vollumfänglich erfüllt, da der Werkzeugbau ohne Einschränkung inklusive der Blech- und Massivumformung über den gesamten Werkzeuglebenszyklus als Betrachtungsbereich für den Ansatz gewählt wird. Die Anforderungen der Kategorie Ganzheitliches Datenmodell werden geringfügig erfüllt. BEGOVIC stellt detailliert die Werkzeugdaten in der Phase der Werkzeugnutzung dar, wobei auf Stammdaten zum Werkzeug, Daten aus dem Planungs- und Steuerungsprogramm der Serienfertigung sowie Qualitätsdaten des mit dem Werkzeug hergestellten Produkts nur oberflächlich eingegangen wird. Ebenso wird die Phase der Werkzeugbereitstellung und Werkzeugverwertung in Bezug auf die Werkzeugdaten nicht detailliert betrachtet. Entsprechend wird die Anforderung im Bereich Werkzeuglebenszyklusdaten nur geringfügig erfüllt. Die Werkzeugkosten werden in keiner der drei Werkzeuglebenszyklusphasen thematisiert. Die Anforderung Erfassung der Werkzeuglebenszykluskosten wird entsprechend nicht erfüllt. Die Anforderungsdimension Systematische Datenerfassung wird geringfügig erfüllt. BEGOVIC beschreibt die Voraussetzungen für die Datenerfassung während der Werkzeugnutzung, wobei er nicht explizit auf konkrete Handlungsempfehlungen für eine fehlerminimierende und verfälschungssichere Erfassung sowie die Erfassung auf Werkzeugkomponentenebene für unterschiedliche Instanzen eingeht. Die Anforderungsdimension Datenanalyse und -auswertung wird nicht erfüllt. BEGOVIC stellt zwar unterschiedliche Methoden der Datenanalyse und -auswertung vor, geht aber nicht auf die systematische Bedarfsermittlung sowie eine anforderungsgerechte Kennzahlenentwicklung ein. Die Anforderungsdimension Datenbasierte Anwendungsfälle wird geringfügig erfüllt. Begovic stellt verschiedene Smart Services vor, geht aber nicht detailliert auf die unternehmensindividuelle Use Case Identifikation und Entwicklung sowie qualitative und quantitative Bewertung ein. Zudem fokussiert er hauptsächlich Use Cases aus Sicht des Werkzeugbaus und vernachlässigt Anwendungsfälle, die aus Sicht des Serienproduzierenden von Interesse sein könnten. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der präsentierte Ansatz nicht zur Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse anwendbar ist.

⁴⁰³ Vgl. Begovic (Datenbasiertes Wissensmanagement für Smart Services im Werkzeugbau), 2017, S. 130-133.

⁴⁰⁴ Vgl. Begovic (Datenbasiertes Wissensmanagement für Smart Services im Werkzeugbau), 2017, S. 135.

Insbesondere im Bereich des ganzheitlichen Datenmodells sowie der datenbasierten Anwendungsfälle bietet er teilweise interessante Denkanstöße. In Abbildung 58 ist die Bewertung des datenbasierten Wissensmanagements für Smart Services im Werkzeugbau nach BEGOVIC dargestellt.

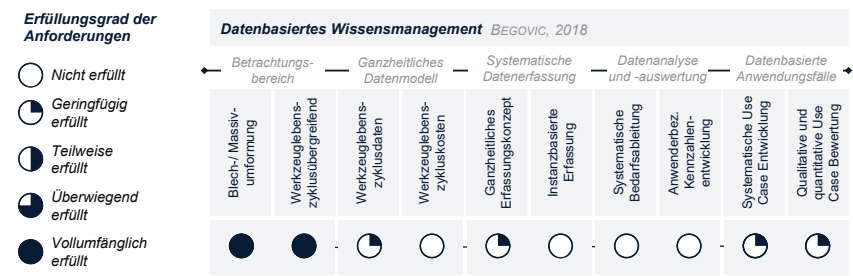


Abbildung 58: Bewertung des Datenbasierten Wissensmanagements im Werkzeugbau⁴⁰⁵

3.2.8 Infrastruktur zur digitalen Vernetzung im Werkzeugbau

BOOS ET AL. beschreiben in Ihrem Ansatz das Zielbild des digital vernetzten Werkzeugbaus als Grundvoraussetzung für die Realisierung von markt- und wertschöpfungsseitigen Potenzialen. Das Zielbild berücksichtigt die einzigartige Position des Werkzeugbaus an der Schnittstelle von Produktentwicklung und Serienproduktion und differenziert für eine anforderungsgerechte Darstellung zwischen einer IT- und einer Anwendersicht. Während die Anwendersicht die konkreten markt- und wertschöpfungsseitigen Potenziale aus Sicht des Werkzeugbaus thematisiert, zeigt die IT-Sicht in den drei Ebenen Datenquellen, Middleware und Datenanalyse die notwendigen Voraussetzungen zur Realisierung der markt- und wertschöpfungsseitigen Potenziale.⁴⁰⁶ In Abbildung 59 ist das Zielbild des digital vernetzten Werkzeugbaus nach BOOS ET AL. abgebildet.

⁴⁰⁵ Eigene Darstellung

⁴⁰⁶ Vgl. Boos et al. (IT-Infrastruktur zur digitalen Vernetzung im Werkzeugbau), 2021, S. 6-7.

konkreten Datenkategorien sowie zu betrachtende Betriebsumgebung ein. Die Anforderung Erfassung der Werkzeuglebenszykluskosten wird nicht erfüllt, da das Thema Werkzeugkosten nicht thematisiert wird. Die Anforderungsdimension Systematische Datenerfassung wird teilweise erfüllt. Während die instanzbasierte Erfassung nur indirekt thematisiert wird, erwähnen die Autoren die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Datenquellen während der Werkzeugbereitstellungs- und Werkzeugnutzungsphase und weist auf die Notwendigkeit einer ganzheitlichen und robusten Datenerfassung über den Werkzeuglebenszyklus hin. Die Kategorie Datenanalyse und -auswertung wird teilweise erfüllt. BOOS ET AL. stellen ein allgemeingültiges, mehrschrittiges Vorgehen für die Datenanalyse vor, das grundsätzlich auch auf die Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten angewendet werden kann, jedoch im Detail weiter ausdifferenziert werden sollte. Auf die anwenderbezogene Kennzahlenentwicklung sowie die systematische Use Case Entwicklung und Bewertung geht der Ansatz nach BOOS ET AL. nicht ein. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der präsentierte Ansatz nicht zur Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse anwendbar ist. Insbesondere im Bereich des Ganzheitlichen Erfassungskonzepts und der Systematischen Bedarfsableitung bietet er teilweise interessante Denkanstöße. In Abbildung 60 ist die Bewertung des Ansatzes zur digitalen Vernetzung im Werkzeugbau nach BOOS ET AL. dargestellt.

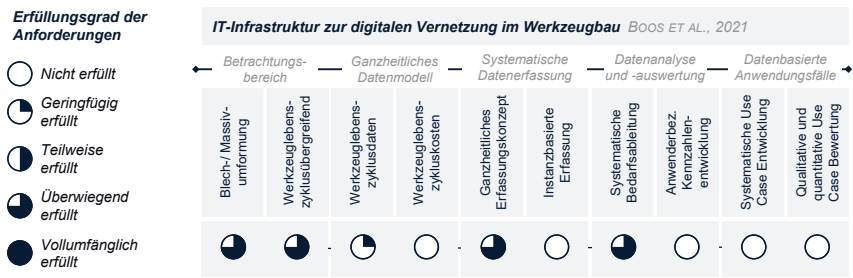


Abbildung 60: Bewertung IT-Infrastruktur zur digitalen Vernetzung im Werkzeugbau⁴⁰⁸

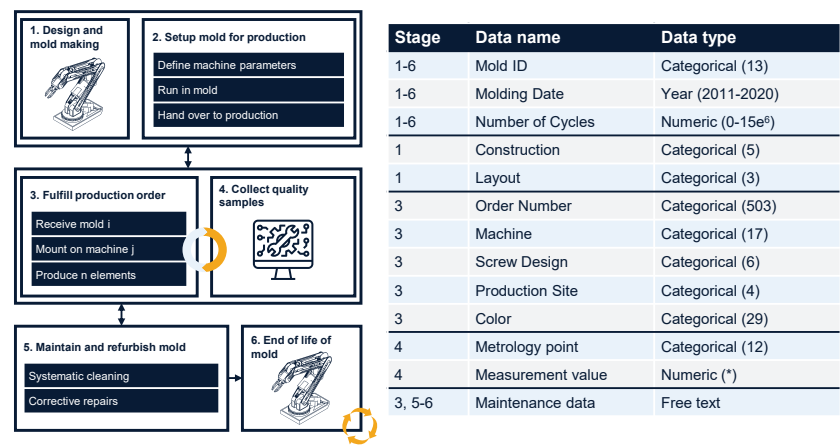
3.2.9 Data-Driven Identification of Remaining Life for Plastic Injection Molds

BÖTTJER ET AL. beschreiben in Ihrem Paper einen datengetriebenen Ansatz zur Identifikation des Abnutzungsfortschritts sowie der verbleibenden Standzeit von Spritzgießformen unter Verwendung von realen Produktionsdaten. Dazu wurde ein industrieller Datensatz über neun Jahre von 2011-2020 mit Metrologie- sowie Lebenszyklusdaten von 13 Spritzgießformen für hohes Produktionsvolumen analysiert und ausgewertet. Für die Erstellung datengesteuerter Modelle des Degradationsverlaufs und zur Klassifizierung des Formzustands wurden multivariante statistische Prozesskontrollen und XGBoost-Klassifizierungsmodelle verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass das entwickelte XGBoost-Modell verschlissene Formen mit einer Klassengenauigkeit von 88% vorhersagen kann.⁴⁰⁹ In der nachfolgenden Abbildung 61 sind die

⁴⁰⁸ Eigene Darstellung

⁴⁰⁹ Vgl. Böttjer et al. (Data-Driven Identification of Remaining Useful Life), 2022, S. 431-433.

sechs erfassten Werkzeuglebenszykluszustände inklusive der jeweils erhobenen Datenkategorien abgebildet.



Zusammengefasst kann mit dem vorgestellten Ansatz gezeigt werden, dass mithilfe der multivarianten statistischen Prozesskontrolle die Degradation von Spritzgussformen überwacht und die verbleibende Lebensdauer identifiziert werden kann. Die Ergebnisse können langfristig für die Weiterentwicklung der Vorhersage von geplanten Instandhaltungsmaßnahmen für die Spritzgussformen verwendet werden. Als Ausblick kann mithilfe der Sammlung von Maschinen- und Prozessdaten die Vorhersagegenauigkeit für den Verschleiß von Spritzgussformen weiter erhöht werden.⁴¹³

Die Bewertungsdimension Betrachtungsbereich wird überwiegend erfüllt. Es handelt sich um einen Ansatz für die Einzel- und Kleinserienfertigung mit Fokusbereich Werkzeugbau, wobei es sich um einen Ansatz für Spritzgussformen und nicht für die Blech- und Massivumformung handelt. Die Anforderung Werkzeuglebenszyklusübergreifende Betrachtung wird vollständig erfüllt, da der Ansatz alle Phasen des Werkzeuglebenszyklus berücksichtigt. Die Kategorie Ganzheitliches Datenmodell wird teilweise erfüllt. Während die Werkzeuglebenszyklusdaten über den gesamten Werkzeuglebenslauf für Spritzgussformen inklusive der zu berücksichtigenden Betriebsumgebung detailliert aufgeführt werden, wird auf die direkte Nennung der Werkzeuglebenszykluskosten vollständig verzichtet. Lediglich indirekt werden die Kosten durch die Optimierung des Formeneinsatzes und die Reduzierung von werkzeugbedingten Produktionsausfällen adressiert. Die Anforderung Erfassung der Werkzeuglebenszykluskosten wird entsprechend nicht erfüllt. Die Anforderungskategorie Systematische Datenerfassung wird teilweise erfüllt. Über den gesamten Spritzgussformenlebenszyklus wird die instanzbasierte Datenerfassung proklamiert und inklusive der Sicherstellung einer anforderungsgerechten Datenqualität detailliert erläutert. Die Anforderung Instanzbasierte Datenerfassung wird entsprechend vollständig erfüllt. Das Erfassungskonzept bezieht sich aktuell nur auf die Werkzeuglebenszyklusdaten und stellt keine konkreten Handlungsempfehlungen für eine fehlerminimierende und verfälschungssichere Erfassung vor. Die Anforderung Ganzheitliches Erfassungskonzept wird folglich nur geringfügig erfüllt. Die Kategorie Datenanalyse und -auswertung wird teilweise erfüllt. Während die Autoren sehr detailliert das Vorgehen und die Ergebnisse der multivarianten statistischen Prozesskontrolle vorstellen und nachvollziehbare Ergebnisse für die Optimierung des Werkzeugeinsatzes herleiten, wird die systematische Bedarfsableitung als gegeben vorausgesetzt und nur die Ergebnisse dieser präsentiert. Die Anforderung Systematische Bedarfsableitung wird entsprechend nur geringfügig adressiert. Die Autoren gehen zudem nicht auf die anwenderbezogene Kennzahlenentwicklung für die anforderungsgerechte Nutzung der Analyseergebnisse über den Werkzeuglebenszyklus ein. Auch die Kategorie Datenbasierte Anwendungsfälle wird nicht erfüllt, da die Autoren sich zwar auf einen konkreten Use Case beziehen und diesen detailliert vorstellen, aber weder die systematische Use Case Entwicklung noch die qualitative und quantitative Bewertung der Use Cases adressieren.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der präsentierte Ansatz nicht zur Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse anwendbar ist. Insbesondere in den Bereichen Datenmodell und Datenerfassung bietet er teilweise interessante Denkanstöße. In

⁴¹³ Vgl. Böttjer et al. (Data-Driven Identification of Remaining Useful Life), 2022, S. 431-438.

Abbildung 63 ist die Bewertung des Data-Driven Identification of Remaining Useful Life for Plastic Injection Molds nach BÖTTJER ET AL. dargestellt.

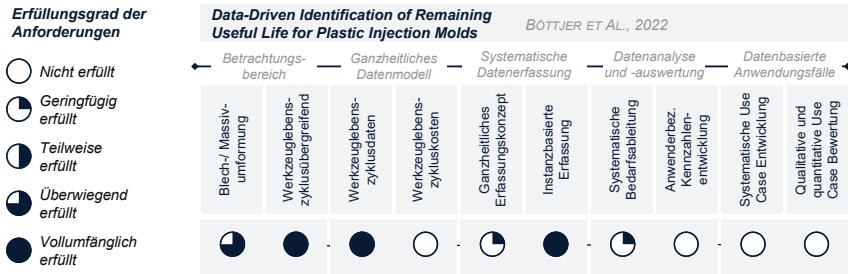


Abbildung 63: Bewertung Data-Driven Identification of Remaining Useful Life⁴¹⁴

⁴¹⁴ Eigene Darstellung

3.3 Aggregation der Bewertung

In Kapitel 3.2 werden insgesamt neun wissenschaftliche Ansätze mit hohem Bezug zur vorliegenden Forschungsfrage präsentiert. Die detaillierte Bewertung der einzelnen Ansätze ist anhand der in Kapitel 3.1 hergeleiteten Bewertungssystematik erfolgt. Die aggregierte Bewertung aller Ansätze ist in Abbildung 64 in übersichtlicher Form dargestellt.

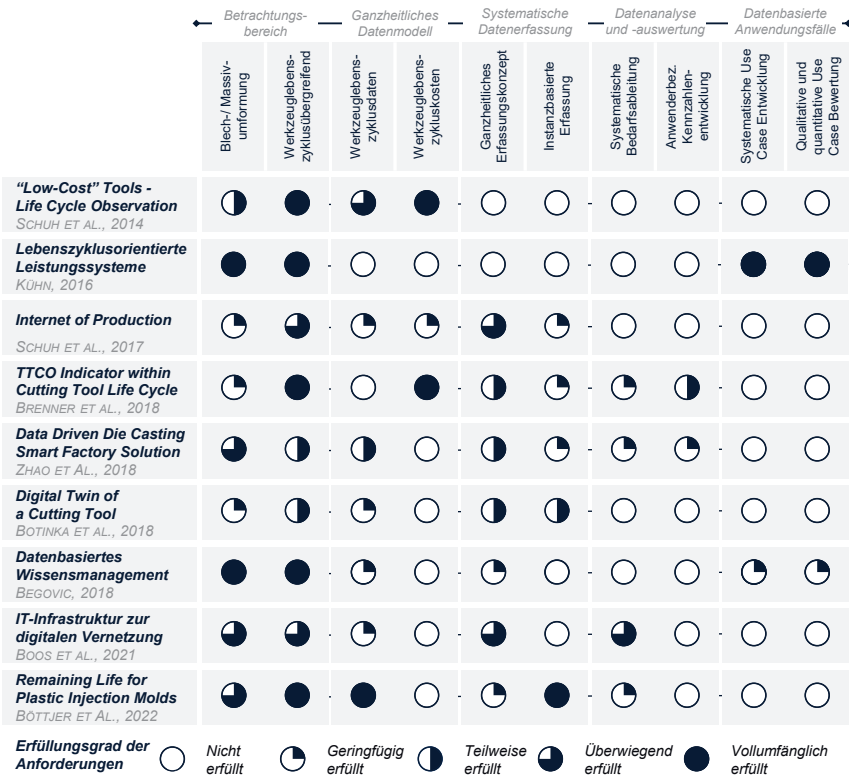


Abbildung 64: Aggregierte Übersicht der bewerteten Ansätze⁴¹⁵

Die Anforderungsdimension Betrachtungsbereich wird lediglich von zwei der neun Ansätze vollständig erfüllt. Die übrigen Ansätze sind in den überwiegenden Fällen zumindest für die Einzel- und Kleinserienfertigung ausgelegt, haben aber nicht den Fokus auf den Werkzeugbau und im Speziellen auf die Blech- und Massivumformung. Die vollständige Betrachtung des Werkzeuglebenszyklus inklusive der Phasen der Werkzeugbereitstellung, der Werkzeugnutzung und der Werkzeugausmusterung werden dementsprechend nicht von allen Ansätzen

⁴¹⁵ Eigene Darstellung

adressiert, wobei fünf Ansätze die Anforderung vollständig erfüllen. Die Anforderungsdimension Ganzheitliches Datenmodell wird von keinem der vorgestellten Ansätze vollumfänglich erfüllt, wobei der Ansatz von SCHUH ET AL. die Anforderungen überwiegend erfüllen kann. Zwei der neun Ansätze beschreiben überwiegend die Werkzeuglebenszyklusdaten über den gesamten Werkzeuglebenszyklus. Für die Werkzeugkosten trifft dies ebenfalls auf zwei der neun Ansätze zu, wobei besonders auf die Ansätze von SCHUH ET AL. und BRENNER ET AL. verwiesen wird, die die Anforderungen vollumfänglich erfüllen. Die Anforderungsdimension Systematische Datenerfassung wird von einem der neun Ansätze teilweise erfüllt, wobei zwei der neun Ansätze ein detailliertes Erfassungskonzept für die Werkzeuginformationen über den gesamten Werkzeuglebenszyklus vorstellen. Für die Instanzbasierte Erfassung der Werkzeuginformationen auf Komponentenebene bieten zwei der neun Ansätze ein detailliertes Konzept, wobei nur der Ansatz nach BÖTTJER ET AL. die Anforderungen vollumfänglich erfüllt. Die Anforderungsdimension Datenanalyse und -auswertung wird von dem Ansatz nach BOOS ET AL. teilweise erfüllt. Der Ansatz stellt ein detailliertes Konzept für die Systematische Bedarfsableitung vor, geht jedoch nicht auf die Anwenderbezogene Kennzahlenentwicklung ein. Auch die anderen Ansätze stellen keine detaillierten Konzepte vor. Lediglich die Ansätze nach BRENNER ET AL. und ZHAO ET AL. erfüllen die gestellten Anforderungen geringfügig. Die Bewertungskategorie Datenbasierte Anwendungsfälle wird lediglich von den Ansätzen nach KÜHN und BEGOVIC zumindest geringfügig erfüllt. Der überwiegende Teil der Ansätze fokussiert sich auf die Entwicklung oder Ausgestaltung eines Anwendungsfalls und weniger auf die systematische Identifikation, Entwicklung sowie Bewertung von datenbasierten Anwendungsfällen im Kontext dieser Arbeit.

Aggregiert betrachtet, können die folgenden systematischen Defizite bisher existierender wissenschaftlicher Ansätze konstatiert werden:

- Es existiert kein Gestaltungsmodell für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse
- Es mangelt an einer konkreten und gleichzeitig ganzheitlichen Betrachtung der definierten Anforderungskategorien Ganzheitliches Datenmodell, Systematische Datenerfassung, Datenanalyse und -auswertung, Datenbasierte Anwendungsfälle sowie Betrachtungsbereich Werkzeugbau mit Fokus auf Blech- und Massivumformwerkzeuge und ganzheitliche Betrachtung des Werkzeuglebenszyklus
- Interdependenzen zwischen den verschiedenen Anforderungsdimensionen werden für die Auslegung einer datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse bisher vernachlässigt
- Es mangelt an einem Ansatz, der zur systematischen Herleitung einer ganzheitlichen Werkzeugakte, bestehend aus Werkzeuglebenszyklusdaten sowie Werkzeuglebenszykluskosten, befähigt
- Es existiert kein Ansatz, der die Besonderheiten von komplexen, vierteiligen Blech- und Massivumformwerkzeugen bei der Auslegung eines ganzheitlichen Erfassungskonzepts auf Werkzeugkomponentenebene unter Berücksichtigung einzelner Instanzen berücksichtigt

- Der Bedarf für eine Werkzeuglebenszyklusübergreifende Datenanalyse und -auswertung wird oftmals nicht systematisch hergeleitet sowie anwender- und anforderungsgerecht visualisiert und für den Zweck der Steuerung instrumentalisiert
- Oftmals werden auf den Werkzeuglebenszyklusdaten und -kosten basierende Anwendungen nicht identifiziert sowie hinsichtlich Funktion, Umsetzungsaufwand und -nutzen bewertet

Basierend auf diesen systematischen Defiziten lässt sich im Folgenden der Handlungsbedarf aus der Theorie ableiten.

3.4 Handlungsbedarf aus der Theorie

Der in Kapitel 2.4 hergeleitete Handlungsbedarf aus der Praxis resultiert in der Forderung nach einem ganzheitlichen Gestaltungsmodell für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Basierend auf diesem Handlungsbedarf aus der Praxis werden fünf Anforderungsdimensionen mit insgesamt zehn spezifischen Anforderungen an ein Gestaltungsmodell für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse hergeleitet. Die definierten Anforderungen bilden die Grundlage zur detaillierten Bewertung relevanter Ansätze aus der wissenschaftlichen Literatur. Die Vorstellung und Bewertung der relevanten Ansätze in Kapitel 3.2 zeigt, dass bisher kein Theorieansatz existiert, der die notwendigen Anforderungen vollumfänglich erfüllt. Hieraus ergeben sich wie in Kapitel 3.3 dargestellt sieben systematische Defizite der bisher existierenden wissenschaftlichen Literatur. Folglich lässt sich feststellen, dass keiner der relevanten Ansätze zur ganzheitlichen Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse geeignet ist. Es besteht folglich Handlungsbedarf aus der Theorie.

3.5 Detaillierung der Forschungsfrage

Für die Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse werden sowohl in Kapitel 2.4 der Handlungsbedarf aus der Praxis sowie in Kapitel 3.4 der Handlungsbedarf aus der Theorie hergeleitet. Dadurch kann der in Kapitel 1.3 postulierte Forschungsbedarf für die vorliegende Dissertation wissenschaftlich begründet werden. Der Forschungsbedarf äußert sich in der folgenden für diese wissenschaftliche Arbeit leitenden Forschungsfrage:

Wie kann die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse durchgängig gestaltet werden?

Aus dieser zentralen und handlungsleitenden Forschungsfrage lassen sich KUBICEK folgend weitere unterstützende Forschungsfragen ableiten.⁴¹⁶ Für die grundlegende Strukturierung der weiteren Forschungsfragen wird erneut auf die vier in Kapitel 2.1.7 und 3.1.2 vorgestellten Themenfelder der VDI-Norm 2884 zur Optimierung der Lebenszykluskosten zurückgegriffen. Eine genauere Betrachtung verdeutlicht, dass aus den vier Themenbereichen Abbildung, Erklärung, Prognose und Gestaltung der VDI-Norm 2884 vier übergeordnete Dimensionen Ganzheitliches Datenmodell, Systematische Datenerfassung, Datenanalyse und -auswertung sowie

⁴¹⁶ i.A.a. Kubicek (Heuristische Bezugsrahmen), 1977, S. 17-25.

Datenbasierte Anwendungsfälle hergeleitet werden können. Der Handlungsbedarf aus der Praxis in Kapitel 2.4 sowie der Handlungsbedarf aus der Theorie in Kapitel 3.4 belegen konkret und detailliert den Forschungsbedarf in den genannten Dimensionen sowie darüber hinaus in der Dimension Werkzeuglebenszyklusübergreifendes Wissensmanagement. Aus dem ersten Themenfeld Abbildung, das als die ganzheitliche Abbildung und Erfassung der lebenszykluskostenbeeinflussenden Faktoren definiert ist, wird die Dimension Ganzheitliches Datenmodell hergeleitet.⁴¹⁷ Die in Kapitel 2.4 vorgestellten Ergebnisse des Konsortialbenchmarks Effiziente Werkzeuginstandhaltung belegen eindrücklich den Praxisbedarf für eine ganzheitliche Abbildung und Erfassung aller relevanten Werkzeuglebenszykluskostenfaktoren und Werkzeuglebenszyklusdaten. Bspw. wird in den meisten Fällen nur ein Teil der relevanten Werkzeuglebenszyklusdaten und -kostenfaktoren auf Komplettwerkzeugebene erfasst. Die Aussage wird gestützt durch die Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse und -bewertung. Die Anforderungsdimension Ganzheitliches Datenmodell wird von keinem Ansatz vollständig erfüllt. Die überwiegende Anzahl der Ansätze erfüllt diese Anforderungsdimension nur geringfügig. Die Grundlage jeder datenbasierten Analyse ist jedoch eine anforderungsgerechte Datenbasis. Im Kontext dieser wissenschaftlichen Arbeit stellt sich daher die folgende Fragestellung:

Welche Daten inkl. Granularität sind über den Werkzeuglebenszyklus in eine Digitale Werkzeugakte zu integrieren?

Das Themenfeld Erklärung ist definiert als die Erklärung der Einflussfaktoren und ihrer Wechselwirkungen auf die Lebenszykluskosten.⁴¹⁸ Aus diesem Themenfeld wird die Dimension Systematische Datenerfassung und -erklärung abgeleitet. Eine weitere notwendige Voraussetzung für die datenbasierte Analyse ist eine ganzheitliche und fehlervermeidende Datenerfassung und -verknüpfung über den gesamten Werkzeuglebenszyklus. Auch in diesem Fall kann das Praxisdefizit mit den Ergebnissen des Konsortialbenchmarks sowie der Literaturanalyse untermauert werden. In der Praxis erfolgt die Datenerfassung zu 69 % auf der Typebene. Zudem werden beispielsweise Fehler sehr häufig nicht systematisch und fehlervermeidend erfasst. Auch in der Literatur besteht noch sehr viel Potenzial. Die meisten der betrachteten Ansätze erfüllen die Anforderungsdimension nur geringfügig oder teilweise. Folglich ist die Beantwortung der folgenden Fragestellung notwendig:

Wie sind die Erfassung und Verknüpfung der Dateninstanzen über den Werkzeuglebenszyklus zu gestalten?

Die Dimension Datenanalyse und -auswertung basiert auf dem Themenfeld Prognose, das definiert ist als Prognose der Lebenszykluskosten und -erlöse sowie nicht monetär erfassbarer Folgewirkungen von Entscheidungsalternativen.⁴¹⁹ Daraus folgt die Dimension Anforderungsgerechte Analyse und Visualisierung der erfassten und aggregierten Werkzeuglebenszyklusdaten und -kosten für die unterschiedlichen Stakeholder entlang der verschiedenen Werkzeuglebenszyklusphasen. Wie den Ergebnissen des KBMs in Kapitel 2.4 entnommen werden kann,

⁴¹⁷ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 4.

⁴¹⁸ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 4.

⁴¹⁹ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 4.

besteht insbesondere im Bereich Datenanalyse und -auswertung noch sehr viel Schulungs- und Entwicklungsarbeit bis die Potenziale der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse, -auswertung und -visualisierung systematisch und umfassend realisiert werden können. Auch im Bereich der Theorie existiert kein Ansatz, der die Bewertungsdimension Datenanalyse und -auswertung vollständig erfüllt. Folglich ist die Beantwortung der folgenden Fragestellung notwendig:

Wie können die Daten über den Werkzeuglebenszyklus anforderungsgerecht analysiert und anschließend für eine gezielte Steuerung visualisiert werden?

Der Themenbereich Gestaltung ist definiert als Erkennung von Möglichkeiten zur optimalen Gestaltung und Beeinflussung von Lebenszykluskosten und -erlösen sowie als Nutzung von Potenzialen zur Kostensenkung. Aus diesem Themenfeld wird die Dimension Datenbasierte Anwendungsfälle abgeleitet.⁴²⁰ Aufbauend auf den gesammelten und analysierten Werkzeuglebenszyklusdaten und -kosten können datenbasierte Anwendungen entwickelt werden, um die Werkzeuglebenszykluskosten kurz-, mittel- oder langfristig zu reduzieren. Praxis- und Theoriedefizite belegen eindrücklich, dass weder in der Praxis noch in der Theorie ganzheitliche Ansätze für die systematische Identifikation, Bewertung und Umsetzung von datenbasierten Use Cases im Anwendungszusammenhang existieren. Die Anforderungsdimension Datenbasierte Anwendungsfälle wird lediglich von einem Ansatz vollständig erfüllt, wobei die restlichen Ansätze diese Anforderungsdimension nur geringfügig bis gar nicht erfüllen. Der Umsetzungsstand in der Praxis ist wie im KBM gezeigt noch sehr gering. Folglich ist die Beantwortung der folgenden Fragestellung notwendig:

Wie sind auf den Werkzeuglebenszyklusdaten basierende Anwendungen hinsichtlich Funktion, Umsetzungsaufwand und -nutzen zu charakterisieren?

Abschließend ist eine bedarfsgerechte Wissensdokumentation und -bereitstellung im Anwendungszusammenhang notwendig, um die Erkenntnisse der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse über den gesamten Werkzeuglebenszyklus bestmöglich abrufen und anwenden zu können. Die Ergebnisse des KBMs in Kapitel 2.4 zeigen, dass lediglich 50 % der Unternehmen ein Wissensmanagementsystem einsetzen, wobei nur 20 % der Unternehmen ein werkzeuglebenszyklusübergreifendes System benutzen. Für eine systematische Analyse und Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten ist die bedarfsgerechte Dokumentation und anwendergerechte Bereitstellung über den gesamten Werkzeuglebenszyklus essentiell. Folglich ist die Beantwortung der folgenden Fragestellung notwendig:

Wie können die Daten über den Werkzeuglebenszyklus zur Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten bedarfsgerecht dokumentiert und wieder bereitgestellt werden?

Im Zuge der Konzeption und Detaillierung eines ganzheitlichen Gestaltungsmodells für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit werden sowohl die handlungsleitende Forschungsfrage als auch die hieraus resultierenden Unterforschungsfragen beantwortet.

⁴²⁰ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 4.

4 Konzeption des Gestaltungsmodells

Im Kontext der Vorstellung und Bewertung bestehender Ansätze zur datenbasierten Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten wird in Kapitel 3 aufgezeigt, dass kein bestehender Lösungsansatz die dargestellten Anforderungen an ein Gestaltungsmodell hinreichend erfüllt. Zur Adressierung des in Kapitel 2.4 aufgezeigten Handlungsbedarfs aus der Praxis sowie in Kapitel 3.4 aus der Theorie wird in diesem Kapitel ein Gestaltungsmodell entwickelt, das die in Kapitel 3.5 dargestellte zentrale Forschungsfrage sowie die in Kapitel 3.1.2 definierten Anforderungen in vollem Umfang erfüllt.

Im vorliegenden Kapitel werden zunächst die Grundlagen wissenschaftstheoretischer Konzeption erläutert. Darauf aufbauend werden die Grundmerkmale des zu entwickelnden Gestaltungsmodells hergeleitet. Dazu zählen das reale System, die Zielsetzung, die Nutzer und der Zeitraum der Nutzung. Anschließend wird das Gestaltungsmodell durch die Definition der Gestaltungselemente konzipiert und durch die Synthese der einzelnen Gestaltungselemente zu einem ganzheitlichen Gestaltungsmodell für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse aggregiert. Das konzipierte Gestaltungsmodell wird abschließend anhand der zentralen Forschungsfrage sowie der definierten Anforderungen kritisch reflektiert.

4.1 Grundlagen der Modellbildung

Die Entwicklung eines Gestaltungsmodells setzt einen wissenschaftlichen Bezugsrahmen voraus. KUHN beschreibt einen solchen Bezugsrahmen als ein allgemein anerkanntes Grundmodell, auf das der wissenschaftliche Fortschritt in einer bestimmten Disziplin aufbaut.⁴²¹ Ein Grundmodell muss nach ULRICH & HILL die nachfolgenden vier Kriterien erfüllen:⁴²²

- Problemlösungskraft
- Allgemeinheit
- Präzision
- Integrationskraft

Aufgrund ihrer Allgemeinheit und Problemlösungskraft ist die Systemtheorie als Bezugsrahmen in der Management- und Organisationstheorie besonders geeignet.⁴²³ In Ergänzung zur Systemtheorie hat sich die Modelltheorie als Hilfsmittel bei der Lösung komplexer Probleme etabliert.⁴²⁴ Nachfolgend werden die theoretischen sowie anwendungsorientierten Aspekte der System- und Modelltheorie vorgestellt.

⁴²¹ Vgl. Kuhn (Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen), 1976, S. 10.

⁴²² Vgl. Ulrich; Hill (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1976, S. 307.

⁴²³ Vgl. Ulrich; Hill (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1976, S. 308-309.

⁴²⁴ Vgl. Neemann (Methodik zum Schutz gegen Produktimitationen), 2007, S. 33.

4.1.1 Systemtheorie

Die Systemwissenschaft dient der Beschreibung und Erklärung von Wachstums- und Anpassungsprozessen sowie der Selbstregulation von Systemen.⁴²⁵ Die übergeordnete Zielsetzung für alle Arten von Systemen ist die Entwicklung valider Theorien.⁴²⁶ Im Jahr 1948 prägte VAN BERTALANFFY den Begriff der Systemtheorie aufbauend auf Ansätzen aus der Zeit der Antike. Kerngedanken sind die ganzheitliche Betrachtungsweise von Problemstellungen und das Denken in Zusammenhängen.⁴²⁷ Abhängig von fachlicher Ausrichtung und Anwendung wird der Systembegriff unterschiedlich definiert.⁴²⁸ Nach BRUNS kann mithilfe der vier nachfolgenden Kriterien ein System identifiziert werden:⁴²⁹

- Ein System besteht aus verschiedenen Elementen
- Die einzelnen Elemente verfügen über beschreibbare Eigenschaften
- Die einzelnen Elemente sind miteinander durch Relationen verbunden
- Die Elemente bilden gemeinsam eine abgegrenzte Struktur

PATZAK definiert ein System als „eine Menge von Komponenten, welche Eigenschaften besitzen und welche durch Beziehungen miteinander zur Verfolgung gesetzter Ziele verknüpft sind“.⁴³⁰ Auf Basis dieser Definition können die einzelnen Elemente eines Systems selbst auch als Systeme im System betrachtet werden. Folglich existiert unabhängig von den gewählten Systemgrenzen immer ein übergeordnetes System.⁴³¹

ROPOHL charakterisiert ein System anhand der drei Elemente Hierarchie, Aufgaben und Struktur. Die Anzahl der Elemente eines Systems wird durch die Hierarchie beschrieben. Das Verhalten des Systems wird durch die Aufgaben des Systems charakterisiert. Aus den Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems können die Aufgaben abgeleitet werden. Die Verbindung der einzelnen Elemente bestimmt die Struktur des Systems.⁴³² Die Abgrenzung des Systems gegenüber der Umgebung geschieht über Systemgrenzen. HABERFELLNER & WECK differenzieren dabei zwischen geschlossenen und offenen Systemen. Geschlossene Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie nur über Verbindungen innerhalb des Systems verfügen. Offene Systeme verfügen sowohl über Verbindung innerhalb des Systems als auch zu ihrer Umgebung oder Umwelt. Die Umgebung oder Umwelt wird als ein separates Element betrachtet, das Einfluss auf das System ausüben kann oder durch das System beeinflusst wird. Es besteht auch die Möglichkeit der gegenseitigen Beeinflussung.⁴³³ In der nachfolgenden Abbildung 65 ist der Aufbau und die Struktur eines Systems dargestellt.

⁴²⁵ Vgl. Wardemann (Rekursion in Modularen Organisationsstrukturen Von Unternehmen), 2000, S. 17.

⁴²⁶ Vgl. Bertalanffy (General system theory), 1968, S. 32-33.

⁴²⁷ Vgl. Patzak (Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme), 1982, S. 10.

⁴²⁸ Vgl. Bruns (Systemtechnik), 1991, S. 30.

⁴²⁹ Vgl. Bruns (Systemtechnik), 1991, S. 31.

⁴³⁰ Bruns (Systemtechnik), 1991, S. 19.

⁴³¹ Vgl. Bruns (Systemtechnik), 1991, S. 31.; Vgl. Patzak (Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme), 1982, S. 6-7.

⁴³² Vgl. Ropohl (Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik), 2009, S. 75-78.

⁴³³ Vgl. Haberkellner et al. (Systems Engineering), 2019, S. 3-11.

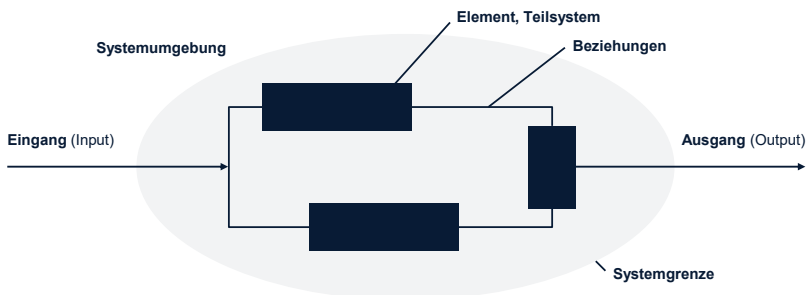


Abbildung 65: Struktur und Aufbau eines Systems⁴³⁴

Die datenbasierte Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten soll nachfolgend als offenes System betrachtet werden, da die Elemente der Lieferanten- und Kundenvernetzung Beziehungen zu Elementen anderer Unternehmensbereiche sowie zu Elementen der Außenwelt der beteiligten Unternehmen aufweisen. In Kapitel 4.2.1 erfolgt die Festlegung der Systemgrenzen.

4.1.2 Modelltheorie

Der Begriff Modell geht auf das lateinische Wort *Modus* zurück, welches Maß, Maßstab, Art und Weise, Form oder Vorschrift bedeutet.⁴³⁵ Nach KLEUKER wird ein Modell als das vereinfachte Abbild der Realität beschrieben. Erkenntnisse, die aus der Untersuchung des Modells gewonnen werden, können auf die Realität übertragen werden. Wenn ein Modell zur korrekten Lösung einer Aufgabenstellung beitragen kann, ist es ein zur Aufgabenstellung passendes Modell.⁴³⁶ Die allgemeine Modelltheorie nach STACHOWIAK präzisiert dieses Verständnis durch die drei Hauptmerkmale Abbildungsmerkmal, Verkürzungsmerkmal und pragmatisches Merkmal.

Das Abbildungsmerkmal besagt, dass jedes Modell ein Abbild oder Vorbild eines Originals ist. Die Originale können dabei selbst wieder Modelle sein. Das Verkürzungsmerkmal führt aus, dass jedes Modell eine Abstraktion vom Original ist. Dabei erfolgt eine Auswahl derjenigen Attribute des Originals, die den Modellierenden und/oder den Modellnutzenden relevant erscheinen. Das pragmatische Merkmal steht dafür, dass Modelle ihrem Original nicht per se eindeutig zugeordnet sind. Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion für bestimmte Objekte innerhalb bestimmter Zeitintervalle und unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen.⁴³⁷

Die Modellbildung überführt ein reales oder gedachtes System auf Basis der Wahrnehmung des Modellierenden in eine explizite Darstellung. Das Ergebnis eines Modellierungsvorgangs ist ein Modell. In Anlehnung an die allgemeine Systemtheorie kann das abzubildende System

⁴³⁴ i.A.a. Paulukuhn (Typologisierung von Entwicklungsprojekten im Maschinenbau), 2005, S. 84.; i.A.a. Bruns (Systemtechnik), 1991, S. 34.; i.A.a. Patzak (Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme), 1982, S. 308.

⁴³⁵ Vgl. Stachowiak (Allgemeine Modelltheorie), 1973, S. 9.

⁴³⁶ Vgl. Kleuker (Formale Modelle der Softwareentwicklung), 2009, S. 1.

⁴³⁷ Vgl. Stachowiak (Allgemeine Modelltheorie), 1973, S. 131-132.

als Menge oder Aggregat von in Beziehung stehenden Elementen aufgefasst werden. Zur besseren Abgrenzung wird es im Folgenden als Originalsystem bezeichnet. Der Vorgang der Modellierung lässt sich nach den Modelleigenschaften von STACHOWIAK als Verkettung der Operationen Projektion, Abstraktion und Übersetzung betrachten.⁴³⁸

Das Originalsystem wird durch die Projektion reduziert, indem sie dessen Elemente und Beziehungen sowie deren jeweiligen Informationsgehalt auf Basis von Filterkriterien auswählt. Das reduzierte System ergibt sich aus der resultierenden Teilmenge des Originalsystems. Jedes zu modellierende Element wird eins zu eins durch die Projektionsoperation in das reduzierte System abgebildet. Der strukturelle Zusammenhang der Elemente bleibt dabei erhalten. Fundamental zur Organisation und Generierung von Wissen ist eine Grundoperation menschlichen Denkens – die Abstraktion. Aus diesem Grund diskutieren viele verschiedene Disziplinen das Thema Abstraktion mit unterschiedlichen Begriffsverständnissen. Für diese Arbeit gilt, dass die Abstraktion zu einer Informationsverdichtung führt, indem sie durch Anwendung von Abstraktionskriterien als äquivalent geltende Elemente und Beziehungen des reduzierten Systems zusammenfasst. Das aus der Abstraktion resultierende System führt zu einem abstrahierten System.⁴³⁹ In der nachfolgenden Abbildung 66 sind die verschiedenen Abstraktionsoperationen und die gegenteiligen Konkretisierungsoperationen aufgeführt und erläutert.

Abstraktions-operation	Konkretisierungs-operation	Beziehung	An der Beziehung beteiligte Partner
Typisierung	Instanziierung	ist Instanz von	Instanz, Typ
Generalisierung	Spezialisierung	ist ein	Spezialisiertes Element (Untertyp), Generalisiertes Element (Obertyp)
Aggregation	Zerlegung	ist Teil von	Teil (Typ), Ganzes (Typ)
Gruppierung	Individualisierung	ist Mitglied von	Mitglied (Typ), Gruppe (Typ)

Abbildung 66: Basisoperationen der Abstraktion⁴⁴⁰

Abschließend transformiert die Übersetzung die Modellinformation in ein explizites Modell. Dieses wird in der Regel in einer Modellierungssprache beschrieben.⁴⁴¹ In der nachfolgenden Abbildung 67 sind der Prozess und die Operationen der Modellierung dargestellt.

⁴³⁸ Vgl. Kurpuweit (Stakeholder-orientierte Modellierung und Analyse der Unternehmensarchitektur), 2009, S. 12.; Vgl. Kühne (Matters of (Meta-) Modeling), 2006, S. 371.
⁴³⁹ Vgl. Kurpuweit (Stakeholder-orientierte Modellierung und Analyse der Unternehmensarchitektur), 2009, S. 12.
⁴⁴⁰ Vgl. Kurpuweit (Stakeholder-orientierte Modellierung und Analyse der Unternehmensarchitektur), 2009, S. 15.
⁴⁴¹ Vgl. Kurpuweit (Stakeholder-orientierte Modellierung und Analyse der Unternehmensarchitektur), 2009, S. 13.

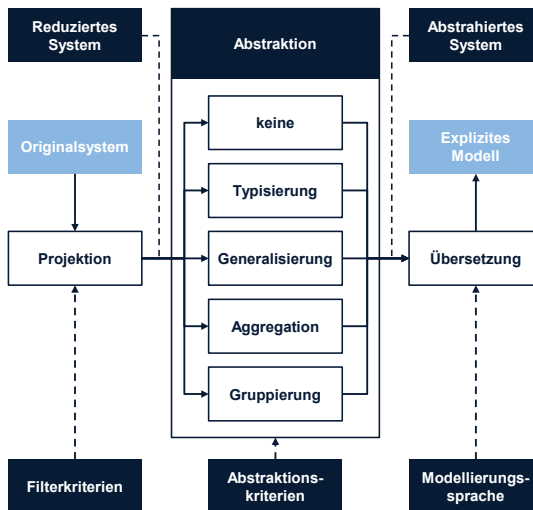


Abbildung 67: Prozess und Operationen der Modellierung⁴⁴²

Für die praktische Nutzung des Modells sollten nach STACHOWIAK das reale System, die Zielsetzung, die Nutzer sowie der Zeitraum der Nutzung festgelegt werden.⁴⁴³ Es existieren zahlreiche Ansätze zur Klassifizierung von Modellen.⁴⁴⁴ Der Klassifizierung von PATZAK und LEHNER ET AL. folgend können Modelle in die Kategorien Beschreibungsmodelle, Erklärungsmodelle, Gestaltungsmodelle und Meta-Modelle gegliedert werden. Der Unterschied der Modellarten besteht in ihrer Zielsetzung und in ihrer vorgesehenen Nutzung.⁴⁴⁵ Nicht immer ist die Zuordnung von Modellen zu entsprechenden Kategorien möglich.⁴⁴⁶ In der nachfolgenden Abbildung 68 sind die vier unterschiedlichen Modellarten dargestellt.

⁴⁴² Vgl. Kurpjuweit (Stakeholder-orientierte Modellierung und Analyse der Unternehmensarchitektur), 2009, S. 13.

⁴⁴³ Vgl. Stachowiak (Allgemeine Modelltheorie), 1973, S. 131-132.

⁴⁴⁴ Vgl. Stachowiak (Allgemeine Modelltheorie), 1973, S. 157-303.

⁴⁴⁵ Vgl. Lehner et al. (Wirtschaftsinformatik), 2008, S. 29-32.; Vgl. Patzak (Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme), 1982, S. 306-315.

⁴⁴⁶ Vgl. Bandte (Komplexität in Organisationen), 2007, S. 205-207.



Abbildung 68: Darstellung der vier unterschiedlichen Modellarten⁴⁴⁷

Beschreibungsmodelle, die auch deskriptive Modelle, Monitormodelle oder Darstellungsmodelle genannt werden, bilden Zustände ab. Sachverhalte oder Phänomene werden von ihnen erfasst und möglichst leicht verständlich beschrieben. Es werden jedoch keine Voraussetzungen für die Gültigkeit der dargestellten Zustände, Wirkungszusammenhänge oder Ursachen dargestellt.⁴⁴⁸

Erklärungsmodelle, die auch explikative Modelle genannt werden, verdeutlichen Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhänge, um Phänomene darstellen und untersuchen zu können. Zudem können sie genutzt werden, um Prognosen zu erstellen. Grundsätzlich bauen sie auf entsprechenden Beschreibungsmodellen auf.⁴⁴⁹

Gestaltungsmodelle bilden eine Veränderung der Realität durch den zielgerichteten Einsatz unterschiedlicher Einflussgrößen ab. Sie stellen den angestrebten Zustand eines Systems dar und geben somit Orientierung. Zu den Gestaltungsmodellen zählen normative und präskriptive Modelle. Normative Modelle beinhalten einen normativen Handlungsrahmen und eine Leitbildfunktion, während präskriptive Modelle vorbildartige Musterfunktionen beschreiben.⁴⁵⁰

Meta-Modelle, die häufig auch generische Modelle oder Referenzmodelle genannt werden, können nicht nur im Kontext, der ihrer Konstruktion zu Grunde liegt, eingesetzt werden, sondern auch in weiteren Anwendungskontexten. Sie erheben einen Anspruch auf Allgemeingültigkeit und formulieren Sollempfehlungen für eine Klasse abstrakter Anwendungsgebiete.⁴⁵¹

Im Rahmen der Kapitel 2.4 und 3.4 werden sowohl der Handlungsbedarf aus der Praxis als auch aus der Theorie erläutert und festgestellt, dass ein neues Zielbild für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse benötigt wird. Entsprechend wird das Gestaltungsmodell als geeignete Modellart gewählt, um eine Lösung für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse entwickeln und abbilden zu können.

⁴⁴⁷ i.A.a. Giehler (Erhöhung der Planungsproduktivität), 2010, S. 78.; i.A.a. Lehner et al. (Wirtschaftsinformatik), 2008, S. 29-32.; i.A.a. Ulrich (Management), 1984, S. 179-181.; i.A.a. Patzak (Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme), 1982, S. 306-315.

⁴⁴⁸ Vgl. Lehner et al. (Wirtschaftsinformatik), 2008, S. 30-31.

⁴⁴⁹ Vgl. Lehner et al. (Wirtschaftsinformatik), 2008, S. 31.

⁴⁵⁰ Vgl. Lehner et al. (Wirtschaftsinformatik), 2008, S. 31-32.

⁴⁵¹ Vgl. Krcmar (Informationsmanagement), 2015, S. 39.; Vgl. Lehner et al. (Wirtschaftsinformatik), 2008, S. 32.

4.2 Merkmale des Gestaltungsmodells

Aufbauend auf den in Kapitel 2.4 definierten Herausforderungen sowie den in Kapitel 3.5 postulierten Zielsetzungen soll ein Gestaltungsmodell entwickelt werden, das einen Zielzustand für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse für die Branche Werkzeugbau darstellt.

Die notwendigen Elemente des Gestaltungsmodells werden basierend auf dem beschriebenen Handlungsbedarf sowie bestehenden wissenschaftlichen Erkenntnissen hergeleitet. Darüber hinaus ist es wie in Kapitel 4.1.1 vorgestellt notwendig, die relevanten Abhängigkeiten der einzelnen Elemente untereinander darzustellen, die durch Veränderungen der Umweltbedingungen eine Reaktion des Modells erfordern. Dazu werden die einzelnen identifizierten Gestaltungselemente unter Einbeziehung gegenseitiger Abhängigkeiten zu einem ganzheitlichen Gestaltungsmodell synthetisiert.

Wie in Kapitel 4.1.2 erläutert, muss ein Modell grundsätzlich die Eigenschaften Abbildung, Verkürzung und Pragmatik aufweisen.⁴⁵² Die Eigenschaft der Abbildung wird dadurch erfüllt, dass das Modell zunächst in Kapitel 4.3 konzipiert und anschließend in Kapitel 5 detailliert wird. Die Fokussierung auf die relevanten Elemente bei der wissenschaftlichen Ausarbeitung des Gestaltungsmodells stellt die Eigenschaft der Verkürzung sicher. Die Eigenschaft der Pragmatik setzt voraus, dass die Merkmale reales System, Zielsetzung, Nutzer und Zeitraum der Nutzung definiert werden.⁴⁵³ Dieser Vorgehensweise folgen auch SCHULTES⁴⁵⁴ und STRACHE⁴⁵⁵, an deren Arbeiten die nachfolgende Ausgestaltung der Merkmale angelehnt ist.

4.2.1 Reales System

Das reale System, auf das sich das zu entwickelnde Gestaltungsmodell bezieht, ist ein wie im Rahmen von Kapitel 2.1 vorgestellter Werkzeugbaubetrieb. Ein wichtiges Charakteristikum des einzelnen Werkzeugbaubetriebs sowie der übergeordneten Branche Werkzeugbau ist die Tatsache, dass Werkzeuge Unikate sind und die einzelnen Werkzeugkomponenten überwiegend in Losgröße eins oder einer geringen Stückzahl hergestellt werden. Der Werkzeugbaubetrieb befindet sich in einem offenen System, da er Umweltbedingungen ausgesetzt ist, die sich bspw. durch gesetzliche Vorgaben oder auch Kunden- und Lieferantenbeziehungen verändern können.⁴⁵⁶

Bezogen auf die Themenstellung dieser Dissertation wird in den Kapiteln 2.1.7 und 2.4 aufgezeigt, dass die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse das Potenzial bietet, der wettbewerbsdifferenzierende Faktor in der zukünftigen Ausrichtung des deutschsprachigen Werkzeugbaus zu werden. Die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse kann je nach Anwendungsfall die drei in Kapitel 2.1.7 eingeführten Werkzeuglebenszyklusphasen

⁴⁵² Vgl. Stachowiak (Allgemeine Modelltheorie), 1973, S. 131-160.

⁴⁵³ Vgl. Stachowiak (Allgemeine Modelltheorie), 1973, S. 157-200.

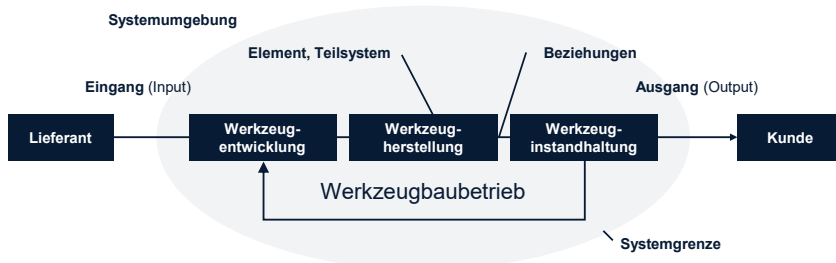
⁴⁵⁴ Vgl. Schultes (Gestaltungsmodell zur digitalen Vernetzung von Werkzeugbaubetrieben mit Lieferanten), 2019, S. 110-111.

⁴⁵⁵ Vgl. Stracke (Gestaltungsmodell für den vernetzten und synchronisierten Serienanlauf von Werkzeugen), 2020, S. 116-118.

⁴⁵⁶ Vgl. Komorek (Gestaltungsmodell für kollaborative Wertschöpfung im industriellen Werkzeugbau), 2014, S. 97.

Werkzeuggestellung, Werkzeugnutzung sowie Werkzeugausmusterung umfassen. Alle an der Werkzeuggestellung, -nutzung, -instandhaltung und -ausmusterung beteiligten Abteilungen des Werkzeugbaus sind Elemente des Systems Werkzeugbaubetrieb. Falls die Werkzeuggestellung, -nutzung, -instandhaltung und -ausmusterung nicht innerhalb des betrachteten Werkzeugbaubetriebs stattfindet, bildet dieser Werkzeugbaubetrieb oder das entsprechende Unternehmen ein eigenes System mit entsprechenden Elementen. Dieses System steht dann in Austausch mit dem betrachteten System Werkzeugbaubetrieb und verfügt über entsprechende Input- und Output-Beziehungen zu diesem. Zu diesen Systemen, die nicht der betrachtete Werkzeugbaubetrieb sind, zählen z. B. Lieferanten, die gegebenenfalls Werkzeugkomponenten fertigen oder instandsetzen, oder der Kunde des Werkzeugbaubetriebs, der das Werkzeug in der Serienproduktion einsetzt. In der nachfolgenden Abbildung 69 sind zwei mögliche Ausprägungen des realen Systems inklusive der Input- und Output-Beziehungen dargestellt. In Ausprägung eins umfasst der Werkzeugbaubetrieb die Werkzeugentwicklung, -herstellung und -instandhaltung. Lieferanten können z. B. Rohmateriallieferanten sein. Die Kunden können Serienproduktionsbetriebe sein, die die Instandhaltung durch den Werkzeugbaubetrieb durchführen lassen. In Ausprägung zwei fokussiert sich der Werkzeugbau ausschließlich auf die Werkzeuginstandhaltung. Der Serienproduzent ist auch in dieser Ausprägung der Kunde. Lieferanten können z. B. Werkzeugkomponentenlieferanten sein.

Ausprägung 1



Ausprägung 2

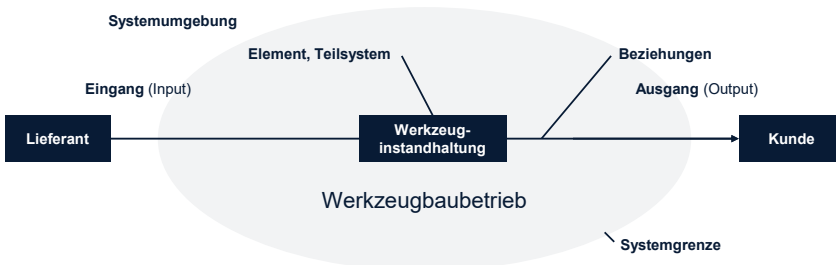


Abbildung 69: Mögliche Ausprägungen des realen Systems⁴⁵⁷

⁴⁵⁷ Eigene Darstellung

Der Geltungsbereich des Gestaltungsmodells muss aufgrund der in Kapitel 2.1.3 erläuterten Unterschiede zwischen den verschiedenen Werkzeugtypen diskutiert werden. Übergeordnet kann festgehalten werden, dass die genannten Herausforderungen des Werkzeugbaus, die übergeordneten Ziele der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse, die eingebundenen Stakeholder sowie das grundsätzliche Vorgehen für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse werkzeugtypübergreifend vergleichbar sind. Folglich verfügt ein zu entwickelndes Gestaltungsmodell für alle Werkzeugtypen über die gleiche Grundstruktur. Einzelne Lösungselemente des Gestaltungsmodells beziehen sich jedoch nur auf ausgewählte Werkzeugtypen. In der vorliegenden Arbeit werden daher partiell Einschränkungen des allgemeingültigen Anwendungskontexts vorgenommen. Teilaspekte der Lösung werden im Detail entsprechend nur für ausgewählte Werkzeugtypen beschrieben.

Wie in Kapitel 2.1.7 erläutert, stellt insbesondere die Erfassung und Auswertung der Werkzeugnutzungskosten und -daten für die beteiligten Entitäten eine große Herausforderung dar. Das ist insbesondere für Blech- und Massivumformwerkzeuge relevant, da sich bei diesen Werkzeugtypen die Werkzeugnutzungskosten auf circa 50 % der Werkzeuglebenszykluskosten belaufen. Ursächlich dafür sind zum einen hohe verschleißbedingte Instandhaltungsaufwände und zum anderen der vergleichsweise hohe Anteil ungeplanter Ausfälle und damit verbunden hohe Kosten für werkzeugbedingte Produktionsstillstände. Zudem erfolgt die Blechbearbeitung wie in Kapitel 2.1.3 erläutert häufig in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten, das die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse für diesen Werkzeugtyp zusätzlich komplizierter gestaltet. Zusammengefasst ergeben sich für die beiden genannten Werkzeugtypen zum einen die größten Handlungsbedarfe, zum anderen aber auch die größten Potenziale für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Folglich erfolgt die Herleitung und Ausgestaltung des Gestaltungsmodells übergeordnet allgemeingültig. Für Teilaspekte des Gestaltungsmodells wird eine Eingrenzung des Anwendungskontexts auf Blech- und Massivumformwerkzeuge vorgenommen. Somit kann im Anwendungskontext relevanten, werkzeugtypspezifischen Unterschieden Rechenschaft getragen werden.

4.2.2 Zielsetzung des Gestaltungskonzepts

Mithilfe des Gestaltungsmodells soll ein anzustrebender Zielzustand für die datenbasierte Analyse der Werkzeugkosten und -daten über den gesamten Werkzeuglebenszyklus dargestellt werden. Aufbauend auf der dargestellten Motivation sollen die Herausforderungen aus der Praxis mithilfe der vorgestellten Chancen der digitalen Vernetzung sowie den vorgestellten Ansätzen des Data Science adressiert werden. Das Gestaltungsmodell soll den Anwendenden Orientierung zur Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse bieten, wobei die genannten Herausforderungen im Kontext der Themenstellung zu berücksichtigen sind. Grundsätzlich soll das Gestaltungsmodell auf die relevanten Inhalte fokussiert sein und die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Gestaltungselementen erläutern.

4.2.3 Zielgruppe des Gestaltungsmodells

Die Zielgruppe des Gestaltungsmodells besteht aus all denjenigen, die sich für die datenbasierte Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten interessieren. Die Zielgruppe kann entsprechend den Arbeiten von KOMOREK, SALMEN und SCHULTES in Anwendende und Verwendende differenziert werden.⁴⁵⁸ Nachfolgend werden die beiden Zielgruppen näher beschrieben.

Anwendende sind alle Personen, die sich aktiv mit der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse auseinandersetzen. Dazu zählen sowohl die Mitarbeitenden des Werkzeugbaus als auch die Mitarbeitenden von Lieferanten und Kunden des Werkzeugbaus. Darüber hinaus zählen Anbieter von digitalen Plattformen oder Softwarelösungen, die die digitale Vernetzung von Werkzeugbaubetrieben mit Kunden anbieten und das Gestaltungsmodell in der Praxis anwenden, zum erweiterten Anwenderkreis. Zusammengefasst können alle, die an der Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse beteiligt sind, Anwender des Gestaltungsmodells sein. Dazu zählen sowohl die operative Durchführung einzelner Aktivitäten als auch strategische sowie taktische Fragestellungen.

Verwendende sind im Gegensatz zu den Anwendenden nicht aktiv an der Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse beteiligt. Im Fokus steht für sie das Verständnis der Zusammenhänge sowie neue technologische und organisatorische Lösungen. Alle internen und externen Anspruchsgruppen eines Werkzeugbaubetriebs zählen entsprechend zu den Verwendenden.

4.2.4 Zeitraum der Nutzung

Grundsätzlich unterliegt der Nutzungszeitraum für das Gestaltungsmodell keiner Beschränkung. Die Nutzung kann dem Grundsatz nach sofort erfolgen, da die Konzeption als Lösungsmodell umgesetzt wird, um den zum Zeitpunkt der Ausfertigung vorliegenden Handlungsbedarf aus Praxis und Theorie für die Gestaltung einer datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse zu adressieren. Die in Kapitel 2 und 3 vorgestellten Grundlagen und theoretischen Ansätze sind jedoch nicht statisch, sondern unterliegen einem beständigen Wandel. Daher gilt der Nutzungszeitraum für dieses Gestaltungsmodell als beendet, sobald das Gestaltungsmodell in seiner Gesamtheit oder einzelne Teile aufgrund zukünftiger Entwicklungen in der Branche Werkzeugbau oder der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse nicht mehr zutreffend sind. Es wird eine regelmäßige Prüfung durch die Wissenschaft empfohlen, ob das vorliegende Modell für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse noch aktuell und die Ergebnisse zweckdienlich sind.

⁴⁵⁸ Vgl. Schultes (Gestaltungsmodell zur digitalen Vernetzung von Werkzeugbaubetrieben mit Lieferanten), 2019, S. 111.; Vgl. Salmen (Gestaltungsmodell für den digital vernetzten Shopfloor im Werkzeugbau), 2016, S. 125.; Vgl. Komorek (Gestaltungsmodell für kollaborative Wertschöpfung im industriellen Werkzeugbau), 2014, S. 97-98.

4.3 Konzeption des Gestaltungskonzepts

In diesem Unterkapitel soll das Gestaltungsmodell für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse konzeptioniert werden. Die weitere Ausgestaltung und Detaillierung der einzelnen Elemente erfolgt in Kapitel 5. Für die Etablierung des zu entwickelnden Modells in der Wissenschaft ist zunächst die Gestaltung eines Ordnungsrahmens notwendig. Mithilfe des Ordnungsrahmens werden bestehende Zusammenhänge auf einem übergeordneten Abstraktionsniveau beschrieben, um dem Gestaltungsmodell somit eine Struktur zu verleihen.⁴⁵⁹ Aufbauend auf der Herleitung eines entsprechenden Ordnungsrahmens folgt innerhalb des aufgespannten Rahmens die Definition von Gestaltungselementen, die den in Kapitel 2.4 und Kapitel 3.4 aufgezeigten Handlungsbedarf aus der Praxis und der Theorie adressieren. Durch die Verknüpfung der einzelnen Gestaltungselemente innerhalb des Ordnungsrahmens kann die Umsetzung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse erfolgen.

Die Herleitung des Ordnungsrahmens für das zu entwickelnde Gestaltungsmodell erfolgt auf Basis der in Kapitel 2 dargestellten Grundlagen sowie den in Kapitel 3 vorgestellten Ansätzen und abgeleiteten Forschungsfragen. Dazu muss die Struktur des Ordnungsrahmens die folgenden Elemente abbilden können:

- Elemente zur Abbildung eines ganzheitlichen Datenmodells
- Elemente zur Abbildung einer systematischen Datenerfassung
- Elemente zur Abbildung einer bauteilspezifischen Datenanalyse und -auswertung
- Elemente zur Abbildung einer Bewertungslogik für datenbasierte Anwendungsfälle
- Elemente zur Abbildung eines übergreifenden Wissensmanagements

4.3.1 Ordnungsrahmen für das Gestaltungsmodell

Für die Erarbeitung des Gestaltungsmodells kommen verschiedene Ordnungsrahmen in Frage. Nachfolgend wird kurz auf die relevantesten Ordnungsrahmen im Anwendungszusammenhang eingegangen und anschließend der gewählte Ordnungsrahmen erläutert. BILSING greift in seiner Dissertation Technologische Leistungsfähigkeit als Ordnungsrahmen für die umfassende wertschöpfungsseitige Beschreibung eines Werkzeugbaubetriebs auf das Aachener Werkzeug- und Formenbau-Management-Modell zurück.⁴⁶⁰ Auch KOMOREK setzt diesen Ordnungsrahmen als Gestaltungsrahmen für die kooperative Wertschöpfung des Werkzeugbaus in Verbindung mit Elementen des General Management Navigators ein.⁴⁶¹ SCHLEYER modelliert Kooperationen entlang der Auftragsabwicklung im Werkzeugbau anhand des Value-Systems-Ansatzes von PORTER.⁴⁶² Die Gestaltungsfelder des industriellen Werkzeugbaus modelliert KLOTZBACH anhand der strategischen Wertschöpfungsprogramme nach MÜLLER-STEWENS & LECHNER.⁴⁶³ Zur Einordnung unterschiedlicher wertschöpfungsseitiger Handlungsop-

⁴⁵⁹ Vgl. Meise (Ordnungsrahmen zur prozessorientierten Organisationsgestaltung), 2001, S. 61-62.

⁴⁶⁰ Vgl. Bilsing (Kennzahlengestützte Bewertung der technologischen Leistungsfähigkeit), 2007, S. 32-33.

⁴⁶¹ Vgl. Komorek (Gestaltungsmodell für kollaborative Wertschöpfung im industriellen Werkzeugbau), 2014, S. 99-100.

⁴⁶² Vgl. Schleyer (Erfolgreiches Kooperationsmanagement im Werkzeugbau), 2006, S. 177-178.

⁴⁶³ Vgl. Klotzbach (Gestaltungsmodell für den industriellen Werkzeugbau), 2007, S. 148-149.

tionen setzt FRICKER auf eine Synthese u. a. des integrierten Management Modells nach BLEICHER.⁴⁶⁴ Auch SALMEN greift auf den Ordnungsrahmen von BLEICHER zurück, um die digital vernetzte Wertschöpfung im Werkzeugbau zu gestalten.⁴⁶⁵

Während alle beschriebenen Ordnungsrahmen Teilaspekte der zuvor dargestellten Kriterien erfüllen können, stellt lediglich das integrierte Management nach BLEICHER einen Ordnungsrahmen dar, in dem alle oben genannten Elemente ganzheitlich verortet werden können. Dazu unterscheidet BLEICHER die Managementaspekte Aktivitäten, Verhalten und Strukturen, die jeweils auf den drei Managementebenen normatives, strategisches und operatives Management angeordnet werden können.⁴⁶⁶ Der Ansatz des integrierten Managements nach BLEICHER stellt entsprechend einen ganzheitlichen Ordnungsrahmen dar und ist in der Wissenschaft als ganzheitlicher und integrativer Bezugsrahmen zur Betrachtung, Analyse und Lösung von Problemen der industriellen Praxis anerkannt.

Die drei vorgestellten Managementaspekte Strukturen, Verhalten und Aktivitäten können insbesondere bezogen auf die Ebene des operativen Managements wie folgt beschrieben werden. Der strukturelle Aspekt umfasst die Etablierung und Steuerung von Prozessen sowie das Vorhandensein einer systemtechnischen Unterstützung. Der strukturelle Aspekt ist somit die Grundvoraussetzung für die darauf aufbauende Leistungserbringung. Verhaltensaspekte zielen hingegen auf das Leistungs- und Kooperationsverhalten im Arbeitsprozess ab und bieten damit Möglichkeiten zur operativen Verbesserung. Abschließend umfassen Aktivitätselemente vielfältige Aspekte zur Gestaltung der Wertschöpfung und Abarbeitung von Aufträgen.⁴⁶⁷

Für die Einordnung des Gestaltungsmodells in den Ordnungsrahmen nach BLEICHER muss die passende Managementebene festgelegt werden. Wie in Kapitel 2.1.5 beschrieben, ist für die Umsetzung einer datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse eine Integration des Werkzeugbaus in die Phase der Werkzeugnutzung beim Kunden sowie eine darauf aufbauende strukturierte Zusammenarbeit notwendig. Die Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse ist somit primär ein Aspekt des operativen Managements. Neben der wirtschaftlichen Effizienz sind im operativen Management sowohl die vertikale und horizontale Kommunikation als auch die unternehmensübergreifende Kooperation von Mitarbeitenden zu betrachten.⁴⁶⁸ Der Aufbau des Ordnungsrahmens für das zu entwickelnde Gestaltungsmodell ist in Abbildung 70 dargestellt. Es ist anhand der zuvor beschriebenen Managementaspekte Aktivitäten, Verhalten und Strukturen aufgebaut.

⁴⁶⁴ Vgl. Fricker (Strategische Stringenz im Werkzeug- und Formenbau), 2005, S. 102-104.

⁴⁶⁵ Vgl. Salmen (Gestaltungsmodell für den digital vernetzten Shopfloor im Werkzeugbau), 2016, S. 126-127.

⁴⁶⁶ Vgl. Bleicher (Das Konzept Integriertes Management), 2011, S. 87-98.

⁴⁶⁷ Vgl. Bleicher (Das Konzept Integriertes Management), 2011, S. 94-95.

⁴⁶⁸ Vgl. Bleicher (Das Konzept Integriertes Management), 2011, S. 90-91.

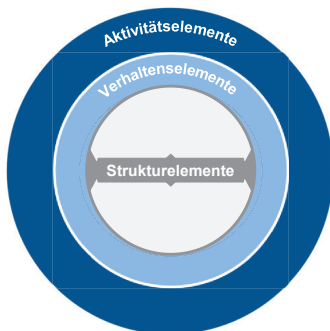


Abbildung 70: Kernelemente des Gestaltungsmodells⁴⁶⁹

Den Kern und zugleich auch die Basis des Gestaltungsmodells bilden die Strukturelemente. Sie repräsentieren die notwendigen Voraussetzungen zur Umsetzung der außenstehenden Aktivitätselemente. Diese erlauben eine wertschöpfungsoptimale Ausgestaltung operativer Aktivitäten der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Die mittig angeordneten Verhaltenselemente verbinden die Strukturelemente mit den Aktivitätselementen und stellen die kontinuierliche Verbesserung des Leistungs- und Kooperationsverhaltens innerhalb des Werkzeugbaus sowie an der Schnittstelle zur Serienproduktion sicher.

Im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels erfolgt die Entwicklung der einzelnen Gestaltungselemente unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.5 definierten Forschungsfragen. Dazu werden innerhalb der einzelnen Gestaltungselemente spezifische Gestaltungsaspekte definiert, die einen Teilaspekt zu dem jeweiligen Gestaltungselement beitragen. Herleitung und Beschreibung der einzelnen Gestaltungselemente und -aspekte erfolgen anhand der drei vorgestellten Managementaspekte Strukturen, Verhalten und Aktivitäten nach BLEICHER. Die Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage erfolgt abschließend durch die Synthese zum Gestaltungsmodell in Kapitel 4.4.

4.3.2 Strukturelement Digitale Werkzeugakte

Das Strukturelement bildet die Basis für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Gemäß der Anforderungsdimension Ganzheitliches Datenmodell in Kapitel 3.1.2.2 ist hierfür ein Datenmodell notwendig, das anforderungsgerecht sowohl Werkzeugdaten als auch Werkzeugkosten über den gesamten Lebenszyklus des Werkzeugs beinhaltet. Dieser Bedarf wird durch das Gestaltungselement Digitale Werkzeugakte aufgegriffen. Für eine Analyse der Werkzeugdaten als auch der Werkzeugkosten über den gesamten Lebenszyklus des Werkzeugs ist laut VDI-Norm 2884 zunächst die ganzheitliche Abbildung und Erfassung der lebenszykluskostenbeeinflussenden Faktoren notwendig.⁴⁷⁰ Entscheidend für die Entwicklung einer Digitalen Werkzeugakte ist zunächst die systematische Bedarfsermittlung. Dazu werden Teil-

⁴⁶⁹ Eigene Darstellung

⁴⁷⁰ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 4.

zielsetzungen zur Reduzierung der Werkzeugkosten und zur Optimierung des Werkzeugeinsatzes identifiziert. Darauf aufbauend folgt die Ableitung der dazu notwendigen Werkzeugdaten und Kostenfaktoren entlang des Werkzeuglebenszyklus.⁴⁷¹ Im Anschluss folgt die Ableitung der zur Realisierung einer Digitalen Werkzeugakte notwendigen Datenquellen. Aufbauend darauf erfolgt die Gestaltung einer anforderungsgerechten Datenstruktur für die Digitale Werkzeugakte. Das Ergebnis des Gestaltungselements ist eine systematisch hergeleitete und entwickelte Digitale Werkzeugakte. Die Gestaltungsaspekte sowie das Ergebnis des Gestaltungselements Digitale Werkzeugakte sind in Abbildung 71 dargestellt.

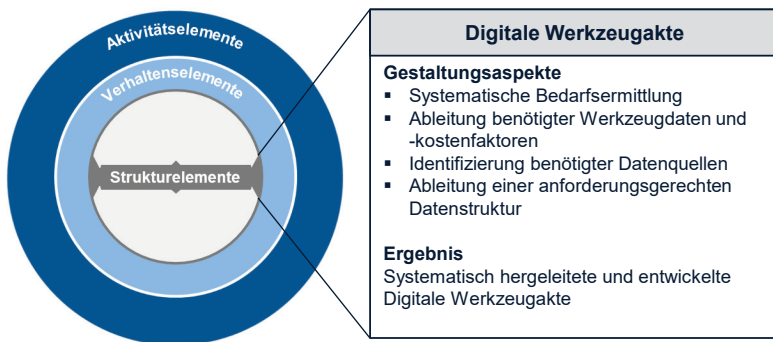


Abbildung 71: Gestaltungselement Digitale Werkzeugakte⁴⁷²

4.3.3 Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement

Das Verhaltenselement des Gestaltungsmodells beschreibt das operative Kooperations- und Lernverhalten über den gesamten Werkzeuglebenszyklus sowohl innerbetrieblich als auch zwischen Werkzeugbaubetrieben und ihren Kunden, den Serienproduzenten. Der Austausch von Daten, Informationen und Wissen innerhalb der Organisation als auch zwischen Werkzeugbaubetrieben und ihren Kunden erfolgt im Kontext der digitalen Vernetzung idealerweise plattformbasiert.⁴⁷³ Das Verhaltenselement wird folglich durch das Gestaltungselement Übergreifendes Wissensmanagement adressiert. Auf einer digitalen übergreifenden Wissensplattform ist sowohl der Werkzeugbau als auch sein Kunde, der Serienproduzent, vertreten. Die Plattform dient dem bilateralen Austausch von Daten, Informationen und Wissen zur Werkzeugbereitstellung, Werkzeugnutzung und Werkzeugverschrottung. Gemeinsam wird wie in den Kapiteln 1.2, 2.1.7 und 2.4 beschrieben die Zielsetzung verfolgt, die Werkzeuglebenszykluskosten sowie die Werkzeugkosten je produziertem Endprodukt zu senken.⁴⁷⁴

Für die Umsetzung eines übergreifenden Wissensmanagements ist zunächst die Identifikation der relevanten Wissensinkremente für die unterschiedlichen Anwendergruppen entlang des

⁴⁷¹ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 11-12.

⁴⁷² Eigene Darstellung

⁴⁷³ Vgl. Boos et al. (Corporate Tooling), 2022, S. 21.

⁴⁷⁴ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 37.

Werkzeuglebenszyklus notwendig.⁴⁷⁵ Darauf folgt die Entwicklung einer Systematik zur Verknüpfung eines Wissensinkrements mit der dazugehörigen spezifischen Werkzeugkomponente, auch Werkzeuginstanz genannt. Nur so kann gewährleistet werden, dass alle relevanten Wissensinkremente übergreifend der jeweiligen Werkzeugkomponente zugerechnet werden können. Der dritte Aspekt stellt die Entwicklung eines strukturierten Vorgehens für die anforderungsgerechte, nutzerfreundliche und zeitnahe Dokumentation von Wissen dar, um eine spätere automatisierte Auswertung und Nutzbarmachung des gesammelten Wissens zu ermöglichen. Abschließend folgt der vierte Aspekt, der die Entwicklung eines Vorgehens für den bedarfsgerechten und nutzerfreundlichen Abruf von Wissen entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus sowohl durch den Werkzeugbau als auch durch den Serienproduzenten thematisiert. Das Ergebnis des Gestaltungselements ist ein werkzeuglebenszyklusübergreifendes Wissensmanagementkonzept für unterschiedliche Nutzergruppen. Die Gestaltungsaspekte sowie das Ergebnis des Gestaltungselements Übergreifendes Wissensmanagement sind in Abbildung 72 dargestellt.

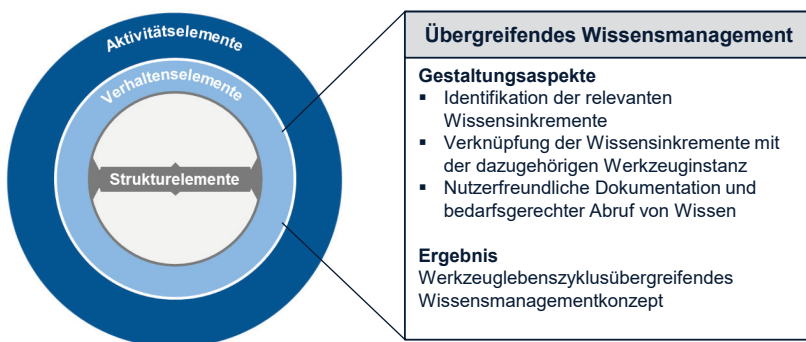


Abbildung 72: Gestaltungselement Übergreifendes Wissensmanagement⁴⁷⁶

4.3.4 Aktivitätselemente

Die erfolgreiche Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse basiert wie in den Kapiteln 1.2, 2.1.7 und 3.1.2 beschrieben auf einer operativen Umsetzung einer werkzeuglebenszyklusübergreifenden Datenerfassung, einer anforderungsgerechten Datenanalyse und -auswertung sowie der Entwicklung und Anwendung weiterer Anwendungen, die auf Werkzeuglebenszyklusdaten sowie -kosten basieren. Diese Anwendungen werden mit der Zielsetzung verwendet, die Werkzeugkosten je produziertem Teil bzw. die Werkzeuglebenszykluskosten nachhaltig zu senken und den Werkzeugeinsatz zu optimieren. Die Umsetzung der drei angeführten Aktivitätselemente stellt den Werkzeugbau sowie die Serienproduzenten wie in den Kapiteln 1.2, 2.1.7 und 2.4 beschrieben vor verschiedene Herausforderungen. Die erste Herausforderung einer bedarfsgerechten Datenerfassung wird durch das Gestaltungs-

⁴⁷⁵ Vgl. Probst et al. (Wissen managen), 2012, S. 32.

⁴⁷⁶ Eigene Darstellung

element Instanzbasierte Datenerfassung adressiert. Die zweite Herausforderung einer anforderungsgerechten Datenanalyse und -auswertung für die verschiedenen Nutzergruppen entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus wird durch das Gestaltungselement Bauteilspezifische Datenanalyse aufgenommen. Die dritte Herausforderung, die gesammelten Daten für weitere Anwendungen nutzbar zu machen und geeignete Anwendungen zu identifizieren und zu bewerten, ist Teil des Gestaltungselements Datenbasierte Use Cases.

Für die Herleitung der drei genannten Gestaltungsfelder wird auf die in den Kapiteln 2.1.7 und 3.1.2 vorgestellten Themenfelder der VDI-Norm 2884 zur Optimierung der Lebenszykluskosten zurückgegriffen. Eine genauere Betrachtung verdeutlicht, dass aus den vier Themenbereichen Abbildung, Erklärung, Prognose und Gestaltung der VDI-Norm 2884 vier übergeordnete Anforderungsdimensionen hergeleitet werden können.⁴⁷⁷ Aus dem ersten Themenfeld Abbildung, das als die ganzheitliche Abbildung und Erfassung der Lebenszykluskosten beeinflussenden Faktoren definiert ist, wird wie in Kapitel 4.3.2 erklärt das Gestaltungselement Digitale Werkzeugakte hergeleitet. Das Themenfeld Erklärung ist definiert als die Erklärung der Einflussfaktoren und ihrer Wechselwirkungen auf die Lebenszykluskosten. Aus diesem Themenfeld wird das Gestaltungselement Instanzbasierte Datenerfassung abgeleitet. Nur eine verlässliche Datenaufnahme auf Werkzeugkomponentenebene für spezifische und individuell identifizierbare Bauteile garantiert eine verlässliche Erklärung von Einflussfaktoren und ihrer Wechselwirkungen auf die Werkzeuglebenszykluskosten.⁴⁷⁸ Das Gestaltungselement Bauteilspezifische Datenanalyse basiert auf dem Themenfeld Prognose, das definiert ist als Prognose der Lebenszykluskosten und -erlöse sowie nicht monetär erfassbarer Folgewirkungen von Entscheidungsalternativen. Für die Prognose der Lebenszykluskosten und -erlöse ist eine detaillierte Analyse für einzelne Werkzeugkomponenten erforderlich. Die Analyse basiert dazu auf der zuvor erläuterten Instanzbasierten Datenerfassung.⁴⁷⁹ Der Themenbereich Gestaltung ist definiert als Erkennung von Möglichkeiten zur optimalen Gestaltung und Beeinflussung von Lebenszykluskosten und -erlösen sowie als Nutzung von Potenzialen zur Kostensenkung. Aus diesem Themenfeld wird das Gestaltungselement Datenbasierte Use Cases hergeleitet. Basierend auf den Gestaltungselementen Instanzbasierte Datenerfassung sowie Bauteilspezifische Datenanalyse wird im Gestaltungselement Datenbasierte Use Cases erläutert, wie die Identifikation, Konzeption, Bewertung und Priorisierung von Use Cases zur kurz-, mittel und langfristigen Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten basierend auf den zuvor erfassten und analysierten Daten erfolgt.⁴⁸⁰

⁴⁷⁷ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 4.

⁴⁷⁸ Vgl. Benning; Wenger (Smart-Data-Management), 2022, S. 198-199; Vgl. Rollins (Foundational Methodology for Data Science), 2015, S. 1-6.

⁴⁷⁹ Vgl. Shearer (The CRISP-DM model), 2000, S. 13-14.

⁴⁸⁰ Vgl. ISO/IEC JTC 1 Information technology, (ISO/IEC 19505-2), 2012, S. 603-614.; Vgl. Brügge et al. (Object-oriented software engineering), 2000, S. 14.

4.3.4.1 Instanzbasierte Datenerfassung

Für eine verlässliche Erklärung von Einflussfaktoren und ihren Wechselwirkungen auf die Werkzeuglebenszykluskosten ist eine verlässliche Datenaufnahme auf Werkzeugkomponentenebene für spezifische und individuell identifizierbare Bauteile unabdingbar.⁴⁸¹ Für die Umsetzung einer Instanzbasierten Datenerfassung erfolgt zunächst eine Status quo Bewertung. Dazu ist die Identifikation der einzelnen Prozessschritte zur Aufnahme der Werkzeugdaten und -kosten entlang des Werkzeuglebenszyklus notwendig. Darauf folgt die Identifikation von möglichen Fehlerquellen bei der Datenerfassung innerhalb einzelner Prozessschritte sowie im Anschluss die Ableitung von Anforderungen an die digitale Instanzbasierte Datenerfassung entlang des Werkzeuglebenszyklus. Abschließend folgt die Entwicklung eines instanzbasier-ten Erfassungskonzepts zur Sicherstellung eines stabilen Erfassungsprozesses entlang des Lebenszyklus. Das Ergebnis des Gestaltungselements ist ein anforderungsgerechter Ansatz zur teilautomatisierten Erfassung der Werkzeugkosten und -daten. Die Gestaltungsaspekte sowie das Ergebnis des Gestaltungselements Instanzbasierte Datenerfassung sind in Abbildung 73 dargestellt.

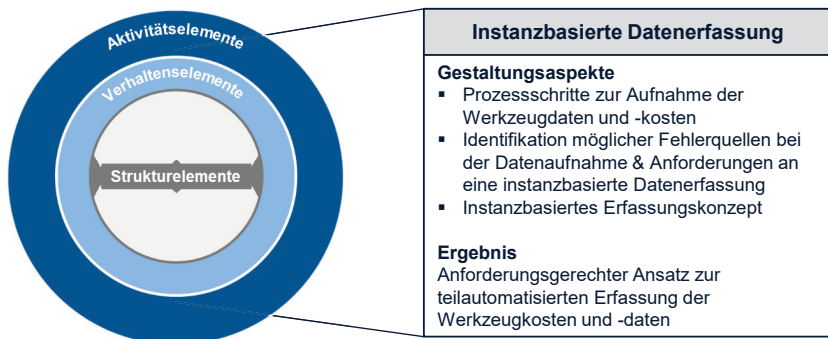


Abbildung 73: Gestaltungselement Instanzbasierte Datenerfassung⁴⁸²

4.3.4.2 Bauteilspezifische Datenanalyse

Mit dem Gestaltungselement Bauteilspezifische Datenanalyse wird die Entwicklung eines Ansatzes für die Datenanalyse und -auswertung auf Werkzeugkomponentenebene verfolgt. Dazu ist zunächst die Identifikation des anwenderabhängigen Informationsbedarfs notwendig. Daraufhin erfolgt die Ableitung des informationsabhängigen Datenbedarfs sowie die Entwicklung standardisierter Analyseszenarien im Anwendungszusammenhang. Basierend darauf folgt die Entwicklung anforderungsgerechter Kennzahlen zur kurz-, mittel- und langfristigen Steuerung

⁴⁸¹ Vgl. Raja et al. (Market Behavior Analysis using Descriptive Approach), 2019, S. 171-173.; Vgl. Ungermann et al. (Data Analytics for Manufacturing Systems), 2019, S. 369-374.; Vgl. Shearer (The CRISP-DM model), 2000, S. 13-14.

⁴⁸² Eigene Darstellung

sowie die Entwicklung eines anforderungsgerechten Visualisierungskonzepts für unterschiedliche Anwendergruppen. Die Gestaltungsaspekte sowie das Ergebnis des Gestaltungselements Bauteilspezifische Datenanalyse sind in Abbildung 74 dargestellt.

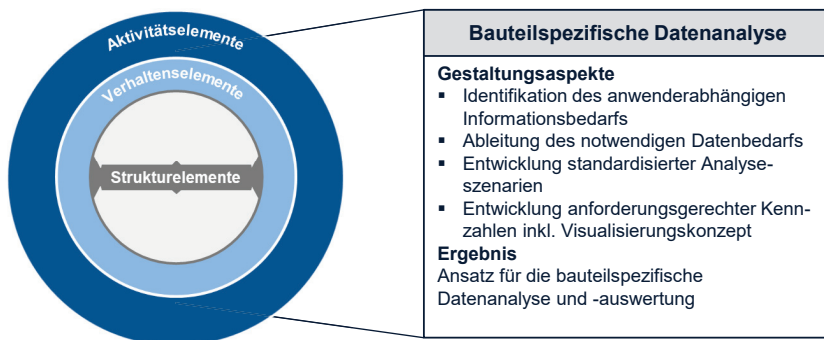
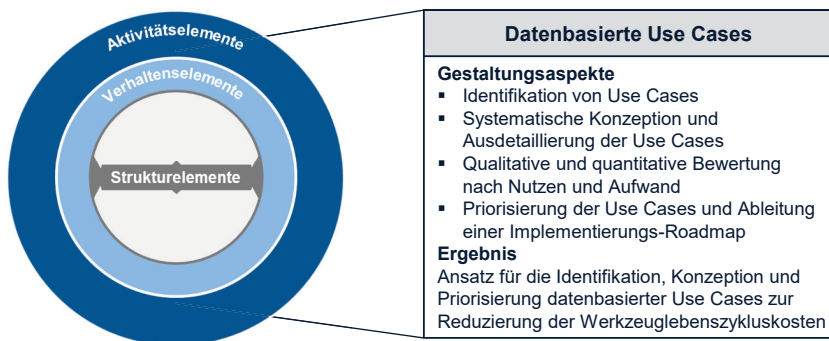


Abbildung 74: Gestaltungselement Bauteilspezifische Datenanalyse⁴⁸³

4.3.4.3 Datenbasierte Use Cases

Das angestrebte Ergebnis des Gestaltungselements Datenbasierte Use Cases ist die Identifikation, Konzeption, Bewertung und Priorisierung von Use Cases zur kurz-, mittel und langfristigen Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten basierend auf den zuvor erfassten und analysierten Daten. Dazu erfolgt zunächst die Identifikation von Use Cases, die auf den Daten der Digitalen Werkzeugakte basieren. Im nachfolgenden Schritt erfolgt die systematische Konzeption und Ausdetaillierung der Use Cases und ggf. eine prototypische Umsetzung. Darauf aufbauend folgt die qualitative und quantitative Bewertung der Use Cases nach Nutzen und Aufwand. Abschließend erfolgt die Priorisierung der Use Cases und Ableitung einer Implementierungs-Roadmap. Die Gestaltungsaspekte sowie das Ergebnis des Gestaltungselements Datenbasierte Use Cases sind in Abbildung 75 dargestellt.

⁴⁸³ Eigene Darstellung

Abbildung 75: Gestaltungselement Datenbasierte Use Cases⁴⁸⁴

4.4 Synthese des Gestaltungskonzepts

Das Gestaltungsmodell zur datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse berücksichtigt das Bezugssystem nach BLEICHER, indem es aus fünf Gestaltungselementen zusammengesetzt ist, die in die drei Dimensionen Strukturen, Verhalten und Aktivitäten unterteilt werden können. Die Anordnung basiert auf der in Kapitel 4.3 erfolgten Herleitung. Im Kern des Gestaltungsmodells steht das Strukturelement Digitale Werkzeugakte. Eine anforderungsgerechte Datenstruktur der für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse notwendigen Werkzeugdaten und -kosten über den gesamten Lebenszyklus des Werkzeugs ist das Fundament für das zu konzeptionierende Gestaltungsmodell und daher als Mittelpunkt bzw. innerster Kreis des Gestaltungsmodells dargestellt.

Daran schließt sich als mittlerer Kreis des Gestaltungsmodells das Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement an. Ein Konzept für den übergreifenden inner- und außerbetrieblichen Austausch von Daten, Informationen und Wissen zwischen den unterschiedlichen Stakeholdern entlang des Werkzeuglebenszyklus unter Berücksichtigung der jeweiligen nutzerabhängigen Anforderungen ist das verbindende Glied zwischen Strukturelement und Aktivitätselementen. Im Vordergrund des Verhaltenselements Übergreifendes Wissensmanagement steht die ganzheitliche Unterstützung bei der Nutzbarmachung der gesammelten, analysierten und ausgewerteten Daten, die Teil der Digitalen Werkzeugakte sind. Daher ist das Verhaltenselement als mittlerer Kreis zwischen dem inneren Strukturelement und den äußeren Aktivitätselementen angeordnet.

Im äußersten Kreis liegen die drei Aktivitätselemente Instanzbasierte Datenerfassung, Bauteilspezifische Datenanalyse und Datenbasierte Use Cases, die in ihrer zeitlichen Chronologie angeordnet sind. Das erste Aktivitätselement ist die Instanzbasierte Datenerfassung, mit der die Zielsetzung verfolgt wird, einen anforderungsgerechten Ansatz zur teil- oder vollautomatisierten Erfassung der Werkzeugkosten und -daten über den gesamten Lebenszyklus zu ent-

⁴⁸⁴ Eigene Darstellung

wickeln. Die Entwicklung erfolgt unter der Maßgabe, eine möglichst hohe Datenqualität zu erreichen. Aufbauend auf dem Verhaltenselement Instanzbasierte Datenerfassung folgt das Verhaltenselement Bauteilspezifische Datenanalyse. Basierend auf dem anwenderabhängigen Informationsbedarf wird ein Ansatz für die bauteilspezifische Datenanalyse und -auswertung erarbeitet, der zum einen die Entwicklung standardisierter Analyseszenarien im Anwendungszusammenhang und zum anderen die Entwicklung anforderungsgerechter Kennzahlen inklusive Visualisierungskonzept umfasst. Als abschließendes Verhaltenselement folgt das Element Datenbasierte Use Cases. Aufbauend auf den erfassten, analysierten und ausgewerteten Daten beinhaltet es einen Ansatz für die Identifikation, Konzeption und Priorisierung datenbasierter Use Cases zur ganzheitlichen Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten. Damit ist die Triologie der Aktivitätselemente, die das Gestaltungsmodell als äußersten Kreis umspannen, vollständig und die Synthese des Gestaltungskonzepts abgeschlossen. In Abbildung 76 werden die einzelnen Gestaltungselemente in ihrer Gesamtheit als Gestaltungsmodell für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse explizit dargestellt.



Abbildung 76: Gestaltungsmodell datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse⁴⁸⁵

4.5 Zwischenfazit

Durch die Konzeption des Gestaltungsmodells für eine datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse soll die anfangs im Rahmen von Kapitel 1.3 definierte handlungsleitende Forschungsfrage beantwortet werden. Diese lautet:

Wie kann die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse durchgängig gestaltet werden?

⁴⁸⁵ Eigene Darstellung

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wird das Gestaltungsmodell in Kapitel 4.3 konzeptioniert und in Kapitel 4.4 synthetisiert. Das Gestaltungsmodell ist in die drei Dimensionen Struktur, Verhalten und Aktivitäten gegliedert und besteht aus den Gestaltungselementen Digitale Werkzeugakte, Übergreifendes Wissensmanagement, Instanzbasierte Datenerfassung, Bauteilspezifische Datenanalyse und Datenbasierte Use Cases. Diese werden im Rahmen von Kapitel 5 detailliert.

Im vorliegenden Abschnitt wird überprüft, ob das konzeptionierte Gestaltungsmodell die in Kapitel 3.1.2 gestellten Anforderungen an ein Modell zur Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse erfüllen kann. Die definierten Anforderungen sind in Abbildung 77 dargestellt.



Abbildung 77: Anforderungen datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse⁴⁸⁶

Die Anforderungen der Kategorie Betrachtungsbereich können sowohl bezogen auf die Branche Werkzeug- und Formenbau sowie die Inkludierung des Werkzeugeinsatzes in der Serienfertigung erfüllt werden. Das Gestaltungsmodell wird explizit für die Branche Werkzeug- und Formenbau konzeptioniert und betrachtet alle Werkzeuglebenszyklusphasen, beginnend bei der Werkzeugbereitstellung über die Werkzeugnutzung bis hin zur Werkzeugausmusterung. In allen Gestaltungselementen können detailliert die branchenbezogenen Anforderungen adressiert werden. Das Gestaltungsmodell kann daher in sehr hohem Maße die Anforderungen der Kategorie Betrachtungsbereich erfüllen. Durch den modularen Aufbau des Gestaltungsmodells kann der entwickelte Ansatz zudem an unterschiedliche Unternehmensrandbedingungen angepasst werden.

Die Anforderungen der Kategorie Ganzheitliches Datenmodell können hinsichtlich der Werkzeuglebenszyklusdaten sowie der Werkzeuglebenszykluskosten vollständig erfüllt werden. Im Strukturelement Digitale Werkzeugakte wird beginnend bei der systematischen Bedarfsermittlung, über die Ableitung der benötigten Werkzeugdaten und -kostenfaktoren sowie der anschließenden Identifizierung der benötigten Datenquellen eine anforderungsgerechte Datenstruktur abgeleitet. Das Ergebnis ist eine systematisch hergeleitete und entwickelte Digitale Werkzeugakte, die sowohl die benötigten Werkzeugdaten als auch die notwendigen Werkzeugkostenfaktoren enthält. Folglich können alle Themenaspekte im Gestaltungsmodell berücksichtigt werden.

Die Anforderungen der Kategorie Systematische Datenerfassung können bezogen auf die beiden Aspekte Ganzheitliches Erfassungskonzept sowie Instanzbasierte Erfassung

⁴⁸⁶ Eigene Darstellung

vollständig erfüllt werden. Im Verhaltenselement Instanzbasierte Datenerfassung werden sowohl die Prozessschritte zur Aufnahme der Werkzeugdaten und -kosten als auch die Identifikation möglicher Fehlerquellen bei der Datenaufnahme sowie Anforderungen an eine instanzbasierte Datenerfassung thematisiert und ein anforderungsgerechter Ansatz zur teilautomatisierten Erfassung der Werkzeuglebenszyklusdaten und -kosten entwickelt. Damit können voraussichtlich alle erforderlichen Aspekte im Gestaltungsmodell adressiert werden.

Die Anforderungen der Kategorie Datenanalyse und -auswertung können hinsichtlich der Teilaspekte Systematische Bedarfsableitung und Anwenderbezogene Kennzahlenentwicklung vollständig erfüllt werden. Das Verhaltenselement Bauteilspezifische Datenanalyse thematisiert die Identifikation des anwenderabhängigen Informationsbedarfs, die Ableitung des notwendigen Datenbedarfs, die Entwicklung standardisierter Analyseszenarien sowie die Entwicklung anforderungsgerechter Kennzahlen zu Steuerungszwecken inklusive eines Visualisierungskonzepts. Das Ergebnis ist ein Ansatz für die bauteilspezifische Datenanalyse und -auswertung, der voraussichtlich alle zuvor genannten Aspekte im Gestaltungsmodell berücksichtigen kann.

Die Anforderungen der Kategorie Datenbasierte Anwendungsfälle können bezogen auf die Aspekte Systematische Use Case Entwicklung sowie qualitative und quantitative Use Case Bewertung voraussichtlich vollständig erfüllt werden. Im Verhaltenselement Datenbasierte Use Cases wird ein Ansatz für die Identifikation, Konzeption und Priorisierung datenbasierter Use Cases zur Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten entwickelt. Dazu wird detailliert auf die Aspekte Use Case Identifikation, systematische Konzeption und Ausdetaillierung der Use Cases, quantitative und qualitative Bewertung nach Nutzen und Aufwand sowie die Priorisierung der Use Cases und die Ableitung einer Implementierungs-Roadmap eingegangen. Damit können voraussichtlich alle erforderlichen Aspekte im Gestaltungsmodell thematisiert werden.

Das konzeptionierte Gestaltungsmodell kann voraussichtlich alle Anforderungen an ein Gestaltungsmodell zur datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse vollständig erfüllen. Zudem dient es der Beantwortung der in Kapitel 3.5 abgeleiteten Unterforschungsfragen:

Welche Daten inkl. Granularität sind über den Werkzeuglebenszyklus in eine Digitale Werkzeugakte zu integrieren?

Die über den Werkzeuglebenszyklus in eine Digitale Werkzeugakte zu integrierenden Daten inklusive der notwendigen Granularität werden im Rahmen des Strukturelements Digitale Werkzeugakte definiert. Dabei werden sowohl Werkzeuglebenszyklusdaten als auch Werkzeuglebenszykluskosten berücksichtigt. Neben der systematischen Identifizierung der benötigten Datenquellen erfolgt zudem die Ableitung einer anforderungsgerechten Datenstruktur.

Wie sind die Erfassung und Verknüpfung der Dateninstanzen über den Werkzeuglebenszyklus zu gestalten?

Die Gestaltung der Erfassung und Verknüpfung der Dateninstanzen über den Werkzeuglebenszyklus erfolgt im Aktivitätselement Instanzbasierte Datenerfassung. Dazu wird ein anforderungsgerechter Ansatz zur teilautomatisierten Erfassung der Werkzeuglebenszyklusdaten und -kosten entwickelt. Relevante Teilschritte sind eine systematische Status-quo Aufnahme und Bewertung in Bezug auf die Prozessschritte zur Aufnahme der Werkzeugdaten und -kosten, die Identifikation möglicher Fehlerquellen bei der Datenaufnahme sowie darauf aufbauend die Ableitung von Anforderungen an eine instanzbasierte Datenerfassung.

Wie können die Daten über den Werkzeuglebenszyklus anforderungsgerecht analysiert und anschließend für eine gezielte Steuerung visualisiert werden?

Das Aktivitätselement Bauteilspezifische Datenanalyse umfasst die anforderungsgerechte Analyse und Visualisierung der Daten über den Werkzeuglebenszyklus. Dazu wird zunächst der anwenderabhängige Informationsbedarf identifiziert und der notwendige Datenbedarf abgeleitet. Darauf aufbauend erfolgt die Konzeption standardisierter Analyseszenarien sowie die Entwicklung anforderungsgerechter Kennzahlen inklusive Visualisierungskonzept zur gezielten Steuerung. Das Ergebnis ist ein anforderungsgerechter Ansatz für die bauteilspezifische Datenanalyse und -auswertung.

Wie sind auf den Werkzeuglebenszyklusdaten basierende Anwendungen hinsichtlich Funktion, Umsetzungsaufwand und -nutzen zu charakterisieren?

Im Rahmen des Aktivitätselements Datenbasierte Use Cases erfolgt die Charakterisierung von auf Werkzeuglebenszyklusdaten basierenden Anwendungen hinsichtlich Funktion, Umsetzungsaufwand und -nutzen. Dazu wird ein Ansatz für die Identifikation, Konzeption, qualitative und quantitative Bewertung sowie abschließende Priorisierung datenbasierter Use Cases zur Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten entwickelt.

Wie können die Daten über den Werkzeuglebenszyklus zur Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten bedarfsgerecht dokumentiert und wieder bereitgestellt werden?

Die Ausgestaltung der bedarfsgerechten Dokumentation und Wiederbereitstellung von Werkzeuglebenszyklusdaten zur Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten erfolgt im Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement. Dazu wird ein werkzeuglebenszyklusübergreifendes Wissensmanagementkonzept gestaltet. Relevante Teilaspekte sind die Identifikation relevanter Wissensinkremente, die Verknüpfung der Wissensinkremente mit der dazugehörigen Werkzeuginstanz sowie die nutzerfreundliche Dokumentation und der bedarfsgerechte Abruf von Wissen. Die genannten Gestaltungselemente werden nachfolgend in Kapitel 5 detailliert.

5 Detaillierung der Gestaltungsfelder

Im folgenden Kapitel wird das konzeptionierte Gestaltungsmodell in den einzelnen Gestaltungselementen ausdetailliert. Die Gestaltungselemente werden dazu, wie in Kapitel 4.3 erläutert, in Struktur-, Verhaltens- und Aktivitätselemente unterteilt. Zu Beginn jedes Gestaltungselements werden die jeweils dem Themengebiet zugeordneten Grundlagen vorgestellt. Anschließend werden die Gestaltungsaspekte des jeweiligen Gestaltungselements erläutert. Abschließend erfolgt die Betrachtung der Wechselwirkungen der unterschiedlichen Gestaltungselemente. Für eine bessere Verständlichkeit der Thematik folgt zunächst die Vorstellung des Strukturelements, gefolgt von den drei Aktivitätselementen. Die Vorstellung des Verhaltenselements bildet den Abschluss.

5.1 Strukturelement Digitale Werkzeugakte

Die Basis für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse bildet das Strukturelement Digitale Werkzeugakte, das nachfolgend detailliert wird. Die Kauf- oder Herstellungsentscheidung für ein Betriebsmittel wird nicht nur durch die Anschaffungskosten, sondern ebenso durch die zu erwartenden Betriebs- und Entsorgungskosten beeinflusst. Für den herstellenden internen oder externen Werkzeugbaubetrieb besteht die Herausforderung, den Anforderungen entsprechende Werkzeuge oder Werkzeugkomponenten zu wettbewerbsfähigen Kosten zu entwickeln, wobei die Summe aus Anschaffungs-, Besitz- und Entsorgungskosten möglichst minimiert werden soll. Im Idealfall beginnt dieser Prozess bereits während der Werkzeugkonzeptionierung und wird über die folgenden Phasen bis hin zur Werkzeugausmusterung fortgesetzt. Die wirtschaftliche Analyse der gesamten Beschaffungs-, Besitz- und Entsorgungskosten eines Werkzeugs wird auch Werkzeuglebenszykluskostenanalyse genannt. Das Ergebnis liefert wiederum wichtige Eingabedaten für den Entwurf, die Entwicklung, Nutzung und Entsorgung ähnlicher Werkzeuge. So können verschiedene Betriebs-, Instandhaltungs- und Entsorgungsstrategien bewertet und ihr Einfluss auf die Werkzeuglebenszykluskosten analysiert werden. Bei der Lebenszykluskostenanalyse kann der Fokus ebenso nur auf einzelne Werkzeugkomponenten oder ausgewählte Lebenszyklusphasen gelegt werden.⁴⁸⁷ Mit der Ermittlung der Lebenszykluskosten wird das primäre Ziel verfolgt, Eingabedaten für Entscheidungen in ausgewählten oder allen Phasen des Werkzeuglebenszyklus zu liefern. Der Fokus liegt dabei sowohl auf der Identifizierung von Kosten als auch auf den zugrundeliegenden Ursachen. Die Ermittlung der Lebenszykluskosten sollte in jedem Fall so zugeschnitten sein, dass entsprechend der gestellten Fragestellung der maximale Nutzen erzielt werden kann. Um eine aussagekräftige Datenbasis für eine systematische Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten zu schaffen, ist nicht nur die reine Erfassung der entsprechenden Kostenpositionen notwendig, sondern darüber hinaus auch die Erfassung der vorherrschenden Rahmenbedingungen erforderlich.⁴⁸⁸ Die Digitale Werkzeugakte bildet die dafür notwendige Basis, indem sie die werk-

⁴⁸⁷ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 7.

⁴⁸⁸ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 7-13.

zeuglebenszyklusübergreifende Erfassung der relevanten Kostenpositionen sowie der entsprechenden Rahmenbedingungen unterstützt. In Abbildung 78 ist das Gestaltungselement Digitale Werkzeugakte inklusive der dazugehörigen Gestaltungsaspekte dargestellt.

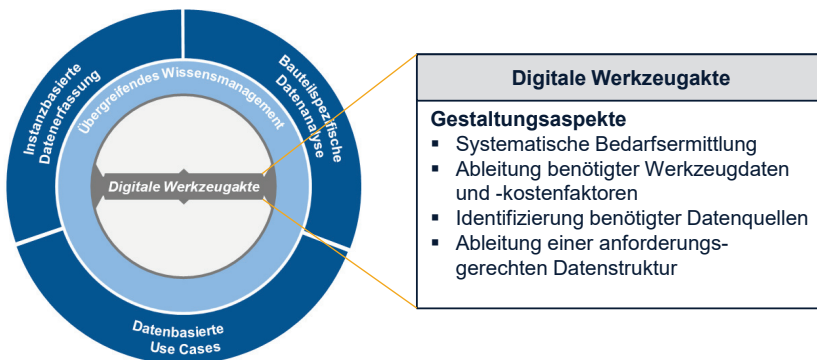


Abbildung 78: Aspekte des Gestaltungselements Digitale Werkzeugakte⁴⁸⁹

Inhaltlich basieren die in diesem Kapitel beschriebenen Inhalte auf mehreren durch den Autor durchgeführten oder begleiteten Konsortial- und Industrieprojekten zu den Themen Konzeption und Umsetzung einer Digitalen Werkzeugakte, digitale Erfassung und Auswertung von Werkzeugstandmengen sowie effiziente Werkzeuginstandhaltung während der Serienproduktion. In Zusammenarbeit mit zahlreichen und namhaften Vertretern des Werkzeugbaus, der Serienproduktion sowie der Werkzeuginstandhaltung sind die Herausforderungen einer datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse diskutiert, Anforderungen abgeleitet und gemeinsam Konzepte für eine werkzeuglebenszyklusübergreifende Digitale Werkzeugakte erarbeitet und diskutiert worden.

Nachfolgend werden zunächst die Grundlagen zum Themenfeld der Werkzeuglebenszykluskosten erläutert und anschließend das Strukturelement Digitale Werkzeugakte detailliert. Entsprechend der in Kapitel 4 dargestellten Herleitung wird zunächst die systematische Bedarfsermittlung vorgestellt. Anschließend folgt die Ableitung der dazu notwendigen Werkzeugdaten und Kostenfaktoren entlang des Werkzeuglebenszyklus. Im anschließenden dritten Schritt folgt die Ableitung der zur Realisierung einer Digitalen Werkzeugakte notwendigen Datenquellen. Aufbauend auf den drei vorangegangenen Schritten erfolgt die Gestaltung einer anforderungsgerechten Datenstruktur für die Digitale Werkzeugakte. Das Ergebnis des Gestaltungselements ist eine systematisch hergeleitete und entwickelte Digitale Werkzeugakte. Die konkrete Ausgestaltung von Datenanalysen oder Use Cases, die auf der Digitalen Werkzeugakte basieren und ggf. die Ergänzung der Datenstruktur der Digitalen Werkzeugakte erfordern, werden in den Kapiteln 5.2.2 und 5.2.3 behandelt.

⁴⁸⁹ Eigene Darstellung

5.1.1 Grundlagen

Methodisch orientiert sich dieses Kapitel an der Beschaffung, dem Betrieb sowie der Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung der Lebenszykluskostenrechnung (engl. Life Cycle Costing, LCC), das in der VDI-Richtlinie 2884⁴⁹⁰ sowie der DIN-Norm EN 60300-3-3⁴⁹¹ erläutert wird. Der grundsätzliche Prozess für die Ermittlung der Lebenszykluskosten nach DIN EN 60300-3-3 umfasst die Identifikation und Bewertung aller relevanten Kosten entlang des Produktlebenszyklus und lässt sich wie in Abbildung 79 dargestellt in die nachfolgenden sechs Schritte unterteilen.⁴⁹²



Abbildung 79: Prozess zur Ermittlung der Lebenszykluskosten⁴⁹³

Die aufgeführten Schritte können iterativ durchgeführt werden, falls sich einzelne Inputparameter oder die Rahmenbedingungen während der Analyse verändern sollten. Grundsätzlich sollten in jedem Schritt getroffene Annahmen genauestens dokumentiert werden, um nachträgliche Iterationen sowie die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern.⁴⁹⁴ Die Qualität des in Schritt zwei entwickelten Lebenszykluskostenmodells, auch Life Cycle Costing Modell genannt, ist maßgeblich für die spätere Ergebnisgüte der ermittelten Lebenszykluskosten.⁴⁹⁵ Daher wird in Abbildung 80 der Prozess für die Entwicklung eines Lebenszykluskostenmodells

⁴⁹⁰ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005.

⁴⁹¹ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005.

⁴⁹² Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 17-18.

⁴⁹³ Eigene Darstellung

⁴⁹⁴ Vgl. Abele et al. (Bedeutung und Anwendung von Lebenszyklusanalysen bei Werkzeugmaschinen), 2009, S. 51-58.; Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 18.

⁴⁹⁵ Vgl. Müller et al. (Lebenszykluskosten in der Digitalen Fabrik), 2016, S. 251.; Vgl. Schweiger (Nachhaltige Wettbewerbsvorteile für Anbieter und Nutzer von Maschinen/Anlagen), 2009, S. 16-32.; Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 23.

nach DIN 60300-3-3:2004 vorgestellt. Dieser umfasst die dargestellten sechs Modellierungsschritte.⁴⁹⁶



Abbildung 80: Prozess für die Entwicklung eines LCC-Modells⁴⁹⁷

Jede Modellierung eines LCC-Modells ist eine vereinfachte Wiedergabe der Realität. Dabei werden die Haupteigenschaften eines Produkts in Kostenschätzgrößen übersetzt. Damit das Modell möglichst realitätsnah ist, sollte es die Merkmale des zu analysierenden Produkts sowie seiner Verwendungsumgebung, des Instandhaltungskonzepts, der Szenarien für Betriebs- und Instandhaltungsbereitschaft sowie beliebige Einschränkungen und Begrenzungen darstellen. Darüber hinaus sollte es zum einen umfassend genug sein, um alle für LCC relevanten Faktoren abzubilden, und zum anderen einfach genug sein, dass es leicht verständlich ist, beim Treffen von Entscheidungen unterstützt und später weiter modifiziert und detailliert werden kann. Abschließend sollte es so ausgelegt sein, dass es die unabhängige Bewertung einzelner Kostenfaktoren ermöglicht.⁴⁹⁸ In Anlehnung an die ersten beiden Schritte des zuvor vorgestellten Vorgehens zur Ermittlung der Produktlebenszykluskosten nach DIN EN 60300-3-3 wird im Folgenden zunächst eine systematische Bedarfsermittlung für die Werkzeuglebenszykluskostenanalyse vorgestellt. Anschließend wird auf die Ableitung benötigter Werkzeugdaten und Werkzeugkostenfaktoren sowie die Identifizierung der benötigten Datenquellen eingegangen. Abschließend folgt die Ableitung einer anforderungsgerechten Datenstruktur. Auf die Schritte drei bis sechs des vorgestellten Vorgehens nach DIN EN 60300-3-3 wird in den nachfolgenden Kapiteln 5.2 bis einschließlich 5.3 eingegangen.

⁴⁹⁶ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 12.

⁴⁹⁷ Eigene Darstellung

⁴⁹⁸ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 11-12.

5.1.2 Systematische Bedarfsableitung

Mit der systematischen Bedarfsableitung wird verfolgt die übergeordnete Zielsetzung sowie den Betrachtungsbereich der Werkzeuglebenszykluskostenanalyse festzulegen. Das Ergebnis der systematischen Bedarfsableitung dient der Erarbeitung einer ersten modularen Datenstruktur für die werkzeuglebenszyklusbegleitende Datenaufnahme, die an sich ändernde Anforderungen oder Rahmenbedingungen angepasst werden kann. Das strukturelle Vorgehen für die systematische Bedarfsableitung ist angelehnt an die zuvor eingeführte DIN 60300-3-3 und unterteilt sich in die sechs Schritte Definition der Zielsetzung, Festlegung des Umfangs der Analyse, Identifizierung der zugrundeliegenden Randbedingungen, Festlegung der zu untersuchenden Handlungsalternativen sowie Abschätzung der erforderlichen Ressourcen. Die sechs genannten Schritte sind in der nachfolgenden Abbildung 81 dargestellt und werden im Folgenden im Anwendungszusammenhang detailliert beschrieben.⁴⁹⁹



Abbildung 81: Vorgehen für die systematische Bedarfsableitung⁵⁰⁰

Definition der Zielsetzung

Zunächst sollte eine klare Zielsetzung für die Werkzeuglebenszykluskostenanalyse definiert werden. Die Zielsetzung sollte insofern beschrieben werden, dass die Ergebnisse, die anhand der Analyse zur Verfügung gestellt werden sollen, und die Entscheidung, für die die Ergebnisse genutzt werden sollen, klar formuliert werden, um den Erfolg der abgeschlossenen Werkzeuglebenszykluskostenanalyse anschließend bewerten zu können.⁵⁰¹ Grundsätzlich können bei der Werkzeuglebenszykluskostenanalyse die zwei Zielkategorien Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten sowie Optimierung der Werkzeugzuverlässigkeit unterschieden werden. Die Unterscheidung basiert darauf, dass über den Lebenszyklus sowohl Kosten als auch Erstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsdaten anfallen, die erfasst und analysiert werden

⁴⁹⁹ i.A.a. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 18.

⁵⁰⁰ Eigene Darstellung

⁵⁰¹ Vgl. Herrmann (Lebensphasenübergreifende Disziplinen), 2010, S. 131.; Vgl. Herrmann; Spengler (Industriearmaturen – Was kosten sie wirklich), 2006, S. 36-38.; i.A.a. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 18.

können. Bei der Zielkategorie Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten liegt der Fokus auf der Erfassung und Reduzierung der Kosten in den einzelnen Werkzeuglebenszyklusphasen. Für die Zielsetzung Optimierung der Werkzeugzuverlässigkeit liegt der Fokus auf den Werkzeuglebenszyklusdaten und ist ausgerichtet auf die Erhöhung der Standmenge bei blechverarbeitenden Werkzeugen bzw. der Standzeit bei kunststoffverarbeitenden Werkzeugen sowie die Reduzierung von werkzeugbedingten Produktionsausfällen. Für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse werden letztendlich beide Zielkategorien benötigt, da mithilfe von Kategorie eins die notwendige Kostentransparenz geschaffen wird und mithilfe von Kategorie zwei die Ursache-Wirkungszusammenhänge analysiert werden können. Nur im Zusammenspiel ist eine systematische und ganzheitliche Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten möglich.⁵⁰² Die Erfassung und Auswertung der Werkzeuglebenszykluskosten und -daten kann für verschiedene Einsatzzwecke angewendet werden. Für ein besseres Verständnis sind in Abbildung 82 beispielhaft mögliche Entscheidungen aufgelistet, für die eine systematische Betrachtung der Werkzeuglebenszyklusdaten und -kosten in Frage kommt. Die Entscheidungen reichen dabei von der Bewertung und dem Vergleich von unterschiedlichen Rohmateriallieferanten bis zur Bewertung und dem Vergleich der Werkzeugkosten je produziertem Teil für zwei unterschiedliche Komplettwerkzeuge.⁵⁰³

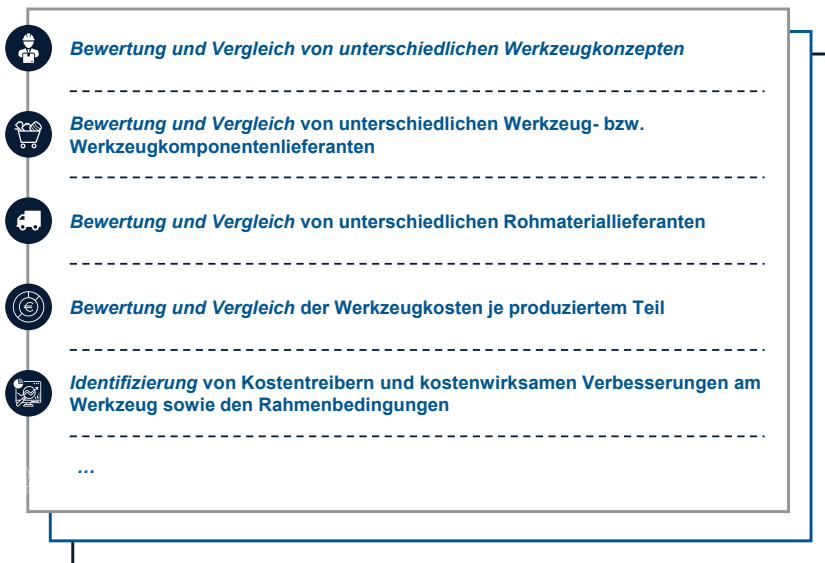


Abbildung 82: Mögliche lebenszyklusdatenorientierte Entscheidungen⁵⁰⁴

Nachdem beispielhaft verschiedene lebenszyklusdatenbasierte Entscheidungen vorgestellt worden sind, wird nachfolgend erläutert wie die systematische Herleitung und Definition der

⁵⁰² Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 1-11.

⁵⁰³ i.A.a. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 7.

⁵⁰⁴ Eigene Darstellung

Zielsetzung einer Werkzeuglebenszykluskostenanalyse erfolgen sollte. Grundsätzlich sollten für die systematische Definition der Zielsetzungen für die Werkzeuglebenszykluskostenanalyse möglichst viele und unterschiedliche Anspruchsgruppen befragt werden, die in einer der drei Werkzeuglebenszyklusphasen einen Einfluss auf die Werkzeugkosten haben oder Verantwortung für die Werkzeugkosten tragen. In der Phase der Werkzeugbeschaffung/-erstellung können dies z. B. der Werkzeugbauleiter, Mitarbeitende oder Leiter der Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, mechanische Fertigung, Qualitätssicherung oder Reifmachung sein. Für die Phase der Werkzeugnutzung sowie der Werkzeugausrüstung können beispielsweise Anlagenbedienende, Produktionsverantwortliche, Qualitätsmanagende, Einkaufende oder Instandhaltende befragt werden. Die Aufnahme der unterschiedlichen Zielsetzungen kann mithilfe von User Stories erfolgen. User Stories bestehen aus den Teilen Karte, Konversation und Akzeptanzkriterien und basieren auf der von RON JEFFRIES eingeführten Alliteration Card, Conversation und Confirmation.⁵⁰⁵ Als Grundstruktur für die User Story hat sich das Muster „Als <Benutzerrolle> will ich <das Ziel>, damit/ so dass <Nutzen/Grund für das Ziel>“ etabliert.⁵⁰⁶ Die User Stories werden im Austausch mit dem Projektteam von den einzelnen Stakeholdern so weit detailliert und diskutiert, bis die durch die Werkzeuglebenszykluskostenanalyse zu erwartenden Ergebnisse sowie die Entscheidung, für die die Ergebnisse genutzt werden soll, verständlich sind.⁵⁰⁷ In der nachfolgenden Abbildung 83 sind in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2884 beispielhaft Fragen dargestellt, an derer überprüft werden kann, ob eine Werkzeuglebenszykluskostenbetrachtung wirtschaftlich gerechtfertigt ist oder nicht. Eine positive Indikation ist gegeben, falls die meisten dieser Fragen mit „ja“ beantwortet werden können.⁵⁰⁸

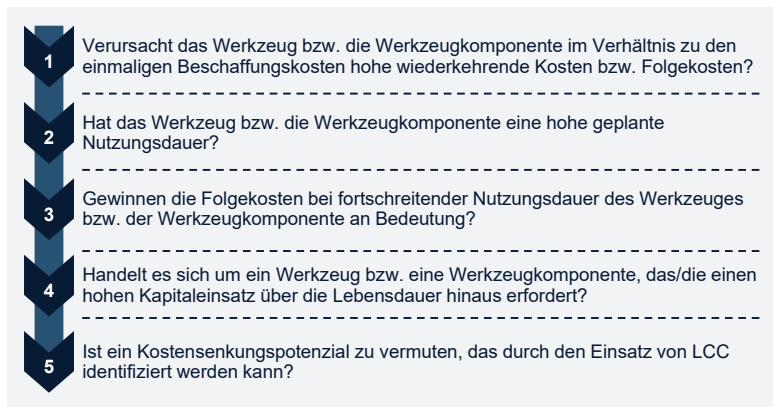


Abbildung 83: Entscheidungshilfe zur LCC-Analyse⁵⁰⁹

⁵⁰⁵ Vgl. Seelmann; Hicking (Projektmanagement), 2022, S. 236.; Vgl. Jeffries et al. (Extreme Programming installed), 2001.

⁵⁰⁶ Vgl. Wirdemann (Scrum mit User Stories), 2011, S. 59.

⁵⁰⁷ i.A.a. Seelmann; Hicking (Projektmanagement), 2022, S. 236-237.

⁵⁰⁸ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 8.

⁵⁰⁹ Eigene Darstellung

Abschließend sollten die identifizierten Zielsetzungen ganzheitlich mit allen Beteiligten diskutiert werden, um zwischen Fundamental- und Instrumentalziel zu differenzieren. So besteht die Möglichkeit, dass ein Ziel genannt wird, die Werkzeuglebenszykluskosten bezogen auf unterschiedliche Produktvarianten zu vergleichen, während ein anderes Ziel lautet, die Werkzeuglebenszykluskosten zu reduzieren. In diesem Fall wäre das erst genannte Ziel ein Instrumentalziel für das übergeordnete Fundamentalziel, die Werkzeuglebenszykluskosten zu senken.

Die identifizierten Zielsetzungen sollten anschließend in ein Zielbild aggregiert werden. In der nachfolgenden Abbildung ist ein beispielhafter Ausschnitt eines Zielbilds für die Werkzeuglebenszykluskostenanalyse dargestellt. Je nach Detaillierungsgrad der User Stories kann das Zielbild mehr oder weniger ausgearbeitet sein. In der nachfolgenden Abbildung 84 sind beispielhafte Zielsetzungen für die Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten sowie die Steigerung der Werkzeugzuverlässigkeit dargestellt.

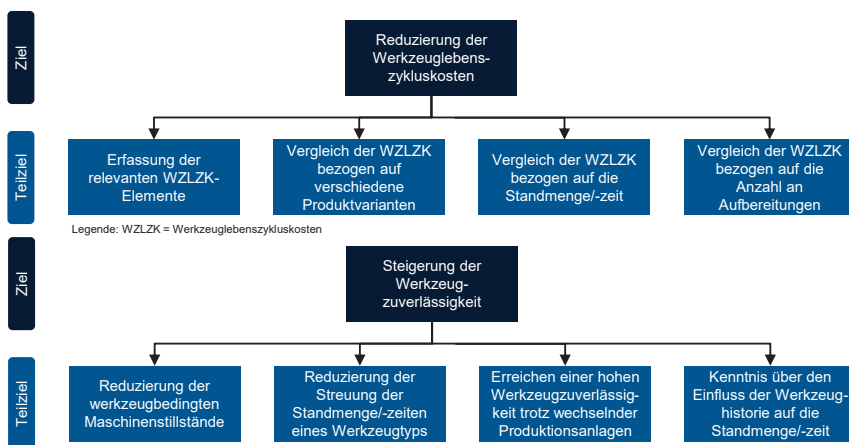


Abbildung 84: Beispielhafte Zielbilder für die Werkzeuglebenszykluskostenanalyse⁵¹⁰

Da die Zusammenhänge zwischen Werkzeugzuverlässigkeit und Werkzeuglebenszykluskosten komplex und in vielen Fällen aufgrund einer fehlenden Datenerhebung nicht quantifizierbar sind, empfiehlt es sich zunächst mit einer Sammlung von Basisdaten zu beginnen und die Datenstruktur iterativ weiterzuentwickeln.⁵¹¹ Das Vorgehen für eine systematische Datenanalyse sowie die dazu gegebenenfalls notwendige Detaillierung der Datenstruktur im Anwendungszusammenhang wird in Kapitel 5.2.2 eingehender betrachtet. Auf die Festlegung der Zielsetzungen folgt im nächsten Unterkapitel die Definition des Umfangs der Analyse.

⁵¹⁰ Eigene Darstellung

⁵¹¹ Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 11.

Festlegung des Umfangs der Analyse

Die Festlegung des Umfangs der Analyse erfolgt im Hinblick auf drei Aspekte:⁵¹²

- Das zu untersuchende Produkt
- Die zu berücksichtigenden Werkzeuglebenszyklusphasen
- Die zu berücksichtigende Betriebsumgebung

Bezogen auf das zu untersuchende Produkt können bei der Werkzeuglebenszykluskostenanalyse drei Kategorien sowie zwei unterschiedliche Betrachtungsebenen unterschieden werden. Die erste Kategorie bezieht sich auf eine konkrete Werkzeugkomponente wie z. B. einen Stempel oder eine Walzbacke. Die zweite Kategorie ist die Baugruppe. Diese besteht aus verschiedenen Werkzeugkomponenten, die zusammengebaut werden, wie z. B. eine Reduzierungsstufe in einem Drahtwerkzeug. Als dritte Kategorie folgt das Komplettwerkzeug, das sich aus den verschiedenen Werkzeugkomponenten sowie Baugruppen zusammensetzt.⁵¹³ Je nach Werkzeugtyp kann es sinnvoll sein, weitere Kategorien vorzusehen. Auf die Abbildung und Erfassung der Daten des Digitalen Schattens sowie des Digitalen Zwillings der Werkzeugkomponente, der Werkzeugbaugruppe sowie des Komplettwerkzeugs werden in Kapitel 5.2.1 eingegangen. In der nachfolgenden Abbildung 85 sind die drei genannten Kategorien dargestellt.

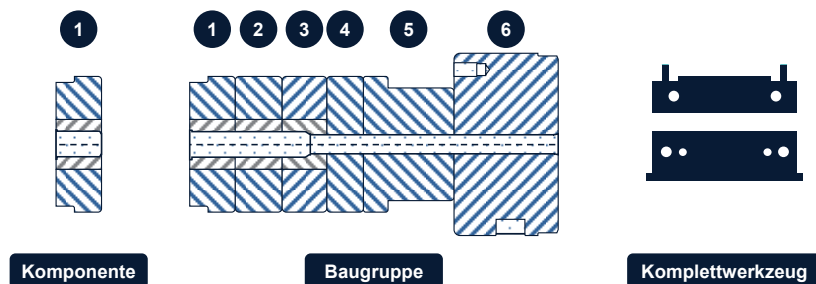


Abbildung 85: Drei Kategorien Komponente, Baugruppe, Komplettwerkzeug⁵¹⁴

Die zwei Betrachtungsebenen, die für das zu untersuchende Werkzeug bzw. die Werkzeugkomponente in Frage kommen, sind die Typ- sowie die Instanzebene. Die Typebene ist oberhalb der Instanzebene angeordnet und bezeichnet eine Klasse beispielweise eines Werkzeugs oder einer Werkzeugkomponente. Eine Instanz ist ein konkretes Objekt innerhalb einer Klasse, wobei jedes Objekt innerhalb der Klasse den Eigenschaften der Klasse entspricht.⁵¹⁵

⁵¹² Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 18.

⁵¹³ Vgl. Boos (Methodik zur Gestaltung und Bewertung von modularen Werkzeugen), 2008, S. 94.; Vgl. Brunkhorst (Integrierte Angebots- und Auftragsplanung im Werkzeug- und Formenbau), 1995, S. 35.

⁵¹⁴ Eigene Darstellung

⁵¹⁵ Vgl. Gehring; Gabriel (Wirtschaftsinformatik), 2022, S. 611.; i.A.a. Schneeweiß (Moderne C++ Programmierung), 2012, S. 91.

Im direkten Vergleich wird deutlich, dass bei einer Betrachtung auf Typebene jeweils nur die durchschnittlichen Werte für die erreichte Standmenge sowie die Werkzeugkosten je produziertem Produkt angegeben werden können. Bei der Betrachtung auf Instanzebene hingegen können die erreichte Standmenge sowie die Werkzeugkosten je produziertem Endprodukt für jede Werkzeugkomponente einzeln aufgeschlüsselt werden. Die Erfassung auf Instanzebene ist durch den höheren Detaillierungsgrad deutlich aufwändiger als auf der Typebene. Die Wahl der Betrachtungsebene sollte in Abhängigkeit von der zuvor definierten Zielsetzung für die Werkzeuglebenszykluskostenanalyse definiert werden. In Abbildung 86 ist der Unterschied zwischen Typ und Instanz abgebildet.

Kosten- und Performancetransparenz auf Typebene

		Typ: Walzbacke		Serialnummer: -	
		Materialnummer: 413272		Identifizierung auf Typebene	
Bezeichnung	Materialnummer	Anzahl	Erreichte Standmenge	WZ-Kosten/Produkt	
Walzbacke	413272	100	Ø 7916	Ø 0,38€	

Kosten- und Performancetransparenz auf Instanzebene



Serialnummer: 1249		Typ: Walzbacke		
Serialnummer: 1250		Materialnummer: 413272		
Serialnummer: 1251		Identifizierung auf Instanzebene		

Bezeichnung	Materialnummer	Serialnummer	Erreichte Standmenge	WZ-Kosten/ Produkt
Walzbacke	413272	1249	7551	0,40€
Walzbacke	413272	1250	10352	0,29€
Walzbacke	413272	1251	5845	0,51€

Abbildung 86: Kosten- und Performancetransparenz auf Typ- oder Instanzebene⁵¹⁶

Bezogen auf die zu berücksichtigenden Werkzeuglebenszyklusphasen kann übergeordnet zwischen den Phasen Werkzeugbereitstellung, Werkzeugnutzung sowie Werkzeugausmusterung unterschieden werden. Die einzelnen Werkzeuglebenszyklusphasen können darüber hinaus in Subphasen unterteilt werden. Je nach gewählter Zielsetzung können alle Phasen oder nur ausgewählte Phasen bzw. Subphasen für die Analyse der Werkzeugkosten herangezogen werden. In der nachfolgenden Abbildung 87 sind die drei Phasen des Werkzeuglebenszyklus, inklusive beispielhafter Subphasen, dargestellt.⁵¹⁷

⁵¹⁶ Eigene Darstellung

⁵¹⁷ i.A.a. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 5.; i.A.a. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 7.

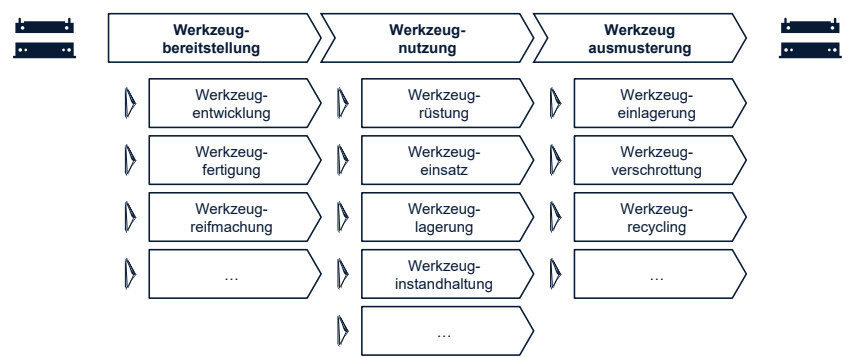


Abbildung 87: Übersicht Werkzeuglebenszyklusphasen inkl. möglicher Subphasen⁵¹⁸

Im nächsten Schritt wird die zu berücksichtigende Betriebsumgebung für die Phase der Werkzeugnutzung definiert. Wie in Kapitel 2.1.1.1 angeführt, orientiert sich das Verständnis des Begriffs Werkzeug an der Definition von EVERSHEIM und KLOCKE. Demzufolge werden im Werkzeugbau ausschließlich Hohlformwerkzeuge hergestellt. Charakteristisch ist die teilweise oder vollständige Abbildung der Werkstückform auf der Werkzeuggeometrie. Beispiele für Hohlformwerkzeuge sind Spritzgießwerkzeuge sowie Blech- und Massivumformwerkzeuge.⁵¹⁹ Da das Hohlformwerkzeug stets in Verbindung mit Maschinen und Anlagen eingesetzt wird, werden Werkzeuge auch als passive Betriebsmittel bezeichnet.⁵²⁰

Zur Betriebsumgebung des Werkzeugs zählt zunächst das Werkzeug selbst über den gesamten Werkzeuglebenszyklus. Berücksichtigt werden beispielsweise Daten zur Erstellung und Reifmachung des Werkzeugs sowie letztendlich zur Werkzeugausmusterung. Darüber hinaus zählen zur Betriebsumgebung beispielsweise die Maschine oder Anlage, auf der das Werkzeug betrieben wird, das Rohmaterial, das für die Herstellung des Endprodukts mithilfe des formgebenden Werkzeugs benötigt wird, das hergestellte Endprodukt, das das Ergebnis des formgebenden Prozesses ist, Instandhaltungsumfänge, die an Werkzeug oder Anlage durchgeführt werden, sowie die jeweilige Zusammensetzung des Werkzeugs aus einzelnen Werkzeugkomponenten und Baugruppen zum jeweiligen Produktionszeitpunkt. Je nach gewählter Zielsetzung können alle oder nur einzelne Aspekte der Betriebsumgebung des Werkzeugs berücksichtigt werden. Je nach Werkzeugtyp kann die zu berücksichtigende Betriebsumgebung variieren. In der nachfolgenden Abbildung 88 sind in Anlehnung an TÖNSHOFF ET AL. beispielhaft die genannten Aspekte der zu berücksichtigenden Betriebsumgebung entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus dargestellt. Für ein besseres Verständnis sind je Betriebsumgebungsdatenkategorie verschiedene Beispiele für zugrundeliegende Daten aufgeführt.⁵²¹

⁵¹⁸ Eigene Darstellung
⁵¹⁹ Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 25-26.
⁵²⁰ Vgl. Bode (Betriebliche Produktion Von Information), 1993, S. 84.
⁵²¹ Vgl. Tönshoff et al. (Lebenszykluskosten von Werkzeugen und Formen), 2005, S. 872-876.

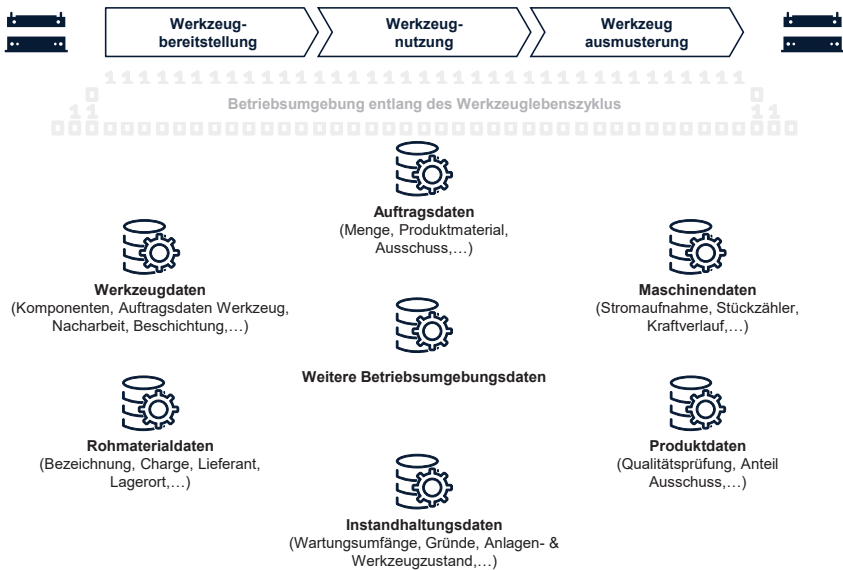


Abbildung 88: Betriebsumgebung entlang des Werkzeuglebenszyklus⁵²²

Identifizierung der zugrundeliegenden Randbedingungen

Der nächste Schritt in der systematischen Bedarfsableitung ist die Identifizierung der zugrundeliegenden Randbedingungen. Dazu zählen alle Bedingungen, Annahmen, Beschränkungen und Randbedingungen, die möglicherweise den Analysebereich einschränken können.⁵²³ Dazu können beispielsweise eine Mindestleistung des Werkzeugs bzw. der Werkzeugkomponente, Verfügbarkeitsanforderungen oder Kostenhöchstgrenzen zählen. Die frühzeitige Identifizierung der zugrundeliegenden Randbedingungen stellt sicher, dass die späteren Ergebnisse der Werkzeuglebenszykluskostenanalyse nutzbare Eingabedaten für die in der Zielsetzung definierte Entscheidung sind. Da sich die zugrundeliegenden Randbedingungen über den Projektverlauf ändern können, ist es wichtig bei einer Änderung der Randbedingungen den Analysebereich der Werkzeuglebenszykluskostenanalyse zu überprüfen und ggf. anzupassen.

Festlegung der zu untersuchenden Handlungsalternativen

Nachdem im Rahmen der systematischen Bedarfsableitung die Zielsetzung und der Umfang der Werkzeuglebenszykluskostenanalyse definiert und die zugrundeliegenden Randbedingungen identifiziert worden sind, folgt die Festlegung der zu untersuchenden Handlungsalternativen. Falls in der definierten Zielsetzung beispielsweise der Vergleich von zwei oder mehreren Werkzeugkomponenten unterschiedlicher Hersteller festgelegt worden ist, erfolgt an dieser

⁵²² I.A. a. Tönshoff et al. (Lebenszykluskosten von Werkzeugen und Formen), 2005, S. 872-876.

⁵²³ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 18.

Stelle die konkrete Auflistung der Handlungsalternativen unter Berücksichtigung der zuvor definierten Randbedingungen. Falls während des Projektverlaufs die zugrundeliegenden Randbedingungen angepasst werden und eine oder mehrere Handlungsalternativen die geänderten Randbedingungen nicht mehr erfüllen, sollten die Handlungsalternativen entfernt oder die Anpassung der Randbedingungen diskutiert werden.⁵²⁴

Abschätzung der erforderlichen Ressourcen

Die Ermittlung der Lebenszykluskosten sollte in einem multidisziplinären Team erfolgen. Einen Teil des Teams sollten Analytiker bilden, die mit den Grundprinzipien der Ermittlung von Lebenszykluskosten vertraut sind. Grundlagen bzw. erweitertes Wissen sollte unter anderem in den Bereichen typische Kostenelemente, Quellen von Kostenarten, finanztechnische Grundregeln sowie dem Umgang mit Unsicherheiten im Zusammenhang mit Kostenschätzung vorhanden sein. Der zweite Teil des Teams sollte aus Fachexperten der verschiedenen Lebenszyklusphasen bestehen, die mit einzelnen Phasen oder dem gesamten Lebenszyklus des Produkts vertraut sind. Dazu können auch Mitarbeitende von Zulieferern oder Kunden zählen.⁵²⁵ Auf Basis der definierten Zielsetzung oder Zielsetzungen sollten die benötigten Kapazitäten abgeschätzt und die erforderlichen Ressourcen allokiert werden.

5.1.3 Ableitung benötigter Werkzeugdaten und -kostenfaktoren

Aufbauend auf der systematischen Bedarfsableitung für eine Werkzeuglebenszykluskostenanalyse folgt die Ableitung der dafür benötigten Werkzeugdaten und -kostenfaktoren. Für ein besseres Verständnis wird zunächst jeweils ein Überblick über die Werkzeugdaten und -kostenfaktoren entlang des Werkzeuglebenszyklus gegeben, bevor auf die Ableitung der benötigten Werkzeugdaten und -kostenfaktoren entsprechend der definierten Zielsetzung eingegangen wird.

Werkzeugkostenfaktoren

Grundsätzlich gibt es keine Übersicht der Werkzeuglebenszykluskosten, die einen Anspruch auf Vollständigkeit erheben könnte, da für jede Werkzeuglebenszykluskostenanalyse individuell zu entscheiden ist, welche Kosten bzw. auch welche nicht unmittelbar monetär quantifizierbaren Faktoren bei der Werkzeuglebenszykluskostenanalyse zu berücksichtigen sind.⁵²⁶ In der nachfolgenden Abbildung 89 sind die relevantesten Kostenpositionen für den Maschinen- und Anlagenbau abgebildet. Dazu zählen Investitions-, Inbetriebnahme-, Qualitäts-, Betriebs-, Wartungs- und Instandhaltungs- sowie Entsorgungskosten.⁵²⁷

⁵²⁴ i.A.a. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 18.

⁵²⁵ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 18.

⁵²⁶ i.A.a. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 11.

⁵²⁷ Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 10-11.

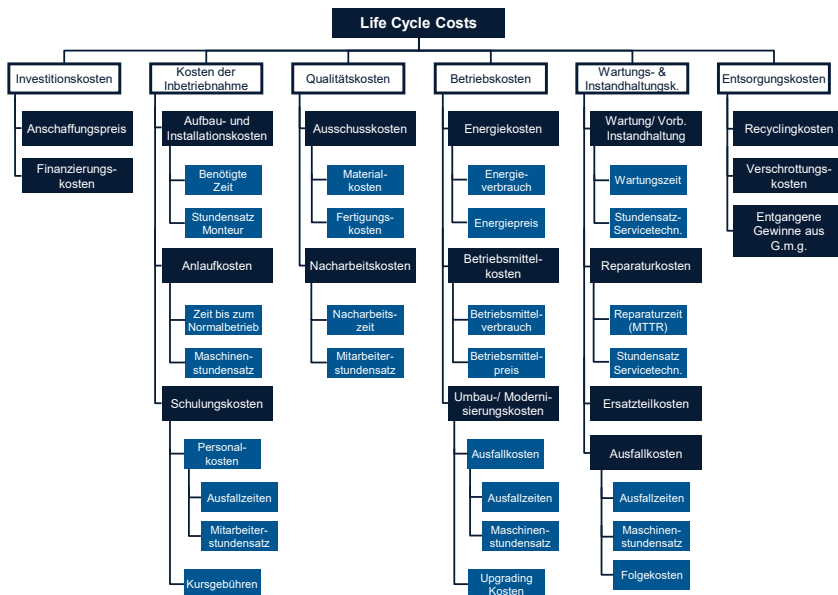


Abbildung 89: Bestandteile der Lebenszykluskosten im Maschinen- und Anlagenbau⁵²⁸

Eine weitere Möglichkeit, die Kostenpositionen entlang des Werkzeuglebenszyklus aufzuteilen, wird in Kapitel 2.1.7 in Abbildung 14 vorgestellt. Die VDI-Richtlinie 2884 bietet darüber hinaus eine weitere Orientierungshilfe.⁵²⁹ Für blech- und kunststoffverarbeitende Werkzeuge hat die Forschungsgemeinschaft Qualität e.V. zudem im Rahmen des Forschungsprojekts Life Cycle Costing (LCC) die nachfolgend aufgelisteten Kosten als wesentliche Treiber der Werkzeuglebenszykluskosten identifiziert:⁵³⁰

- Herstellkosten
- Optimierungskosten
- Instandhaltungskosten
- Werkzeugbedingte Stillstandskosten

In Anlehnung an die vorgestellten Quellen werden in der nachfolgenden Abbildung 90 die relevantesten Kostenpositionen entlang der drei Werkzeuglebenszyklusphasen dargestellt. Während der Werkzeugbereitstellungsphase kann zwischen der Eigen- und Fremdfertigung differenziert werden. Zu den relevantesten Kostenpositionen der Eigenfertigung zählen die Entwicklungs-, Fertigungs- und Reifmachungskosten. Bei der Fremdfertigung zählen zu den relevantesten Kostenpositionen die Entwicklungs- und Beschaffungskosten. Zu den relevan-

⁵²⁸ i.A.a. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. S. 10-11.

⁵²⁹ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 12-16.

⁵³⁰ Vgl. Reinsch; Eger (Life Cycle Costs), 2006, S. 10.

testen Kostenpositionen der Werkzeugnutzungsphase zählen Rüstkosten, Lagerkosten, Wartungskosten, Instandhaltungskosten, Ersatzteilkosten, werkzeugbedingte Maschinenstillstandskosten sowie Ausschusskosten. Die relevantesten Kostenpositionen während der Werkzeugausmusterungsphase sind Verschrottungs-, Einlagerungs- sowie Recyclingkosten.

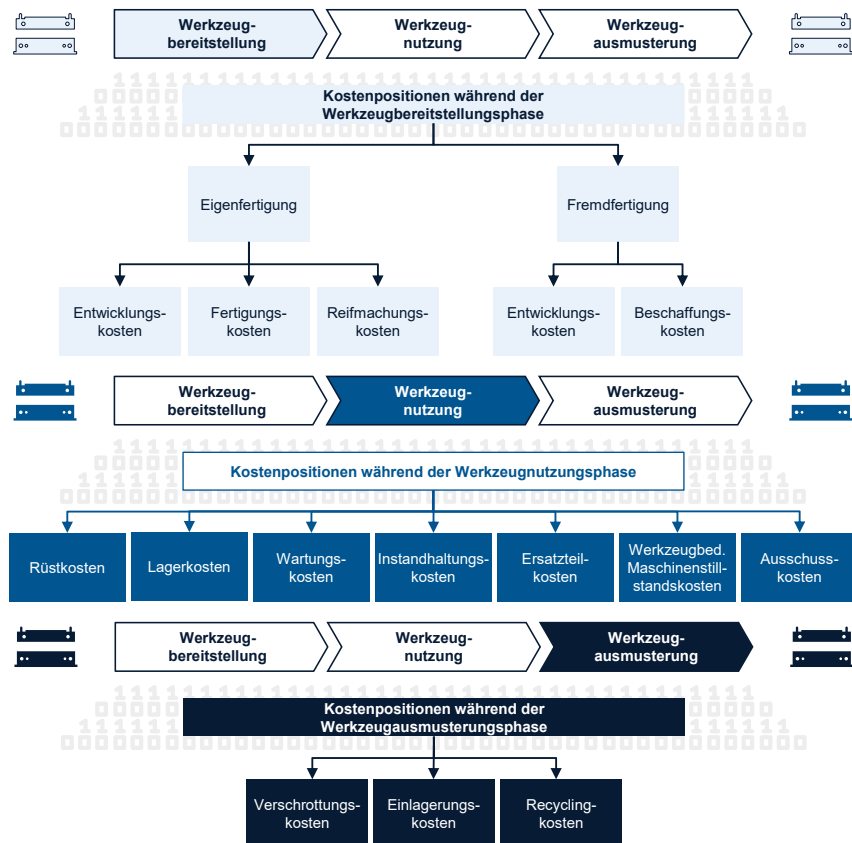


Abbildung 90: Kostenpositionen während der drei Werkzeuglebenszyklusphasen⁵³¹

Im Folgenden wird der Prozess für die Entwicklung eines Life-Cycle-Costing-Modells auf Basis der DIN 60300-3-3:2004 vorgestellt. Der dazugehörige Prozess umfasst die in Abbildung 91 dargestellten sechs Modellierungsschritte.⁵³²

⁵³¹

⁵³² Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 12.



Abbildung 91: Prozessschritte Entwicklung LCC-Modell⁵³³

Auf Basis der entwickelten Zielsetzung des festgelegten Umfangs der Analyse sowie der identifizierten Randbedingungen kann die systematische Entwicklung des LCC-Modells begonnen werden. Die Zielsetzung des LCC-Modells besteht darin, ein Berechnungsmodell für die relevantesten Kostenpositionen der Werkzeuglebenszykluskosten zu entwickeln. Mithilfe des Berechnungsmodells sollen die Kosten einer Werkzeugkomponente, einer Baugruppe oder eines Komplettwerkzeugs zum einen am Lebensende auf Typ- oder Instanzebene berechnet und zum anderen auf Basis der gesammelten Daten Kostenprognosen für ähnliche Werkzeugtypen abgeleitet werden können.

Dazu werden entsprechend der DIN EN 60300-3-3 die Lebenszykluskostenelemente in einer dreidimensionalen Matrix entlang der Dimensionen Kostenart, Produktsubsystem und Lebenszyklusphase strukturiert. Bei den Kostenarten können beispielsweise Arbeitskosten, Sachkosten, Energiekosten, Gemeinkosten und Transportkosten unterschieden werden. Das Produktsubsystem beschreibt den Aufbruch des Produkts in niedrigere Gliederungsebenen bis das gewählte Kostenelement verursachungsgerecht zugeordnet werden kann.⁵³⁴ Ein Kostenelement ist dabei die Verbindung einer Einheit der Produktstruktur mit der zu betrachtenden Kostenart.⁵³⁵ Die Lebenszyklusphase beschreibt den Zeitabschnitt im Produktlebenszyklus, der für die Betrachtung des ausgewählten Kostenelements relevant ist. Das in Abbildung 92 dargestellte Kostenelement zeigt beispielsweise die Personalkosten für die Herstellung eines

⁵³³ Eigene Darstellung

⁵³⁴ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 14.

⁵³⁵ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 33.

Stromversorgungsteils. Das Modell eignet sich besonders für komplexe Produkte, welche eine mehrgliedrige Struktur aufweisen.⁵³⁶

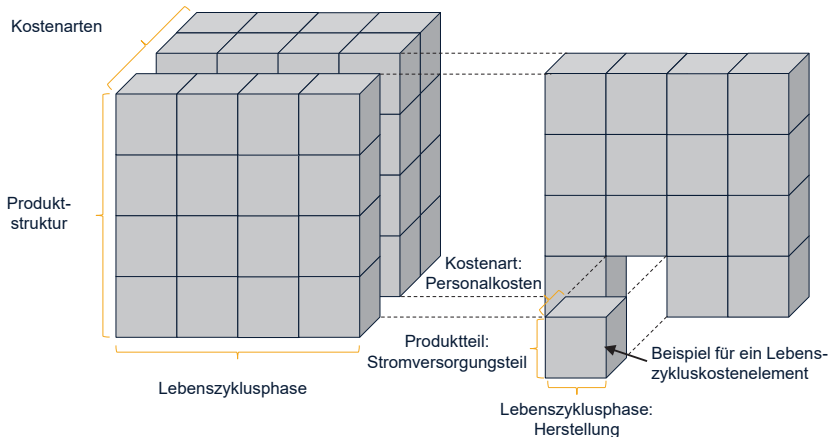


Abbildung 92: Lebenszykluskostenstruktur nach DIN EN 60300-3-3⁵³⁷

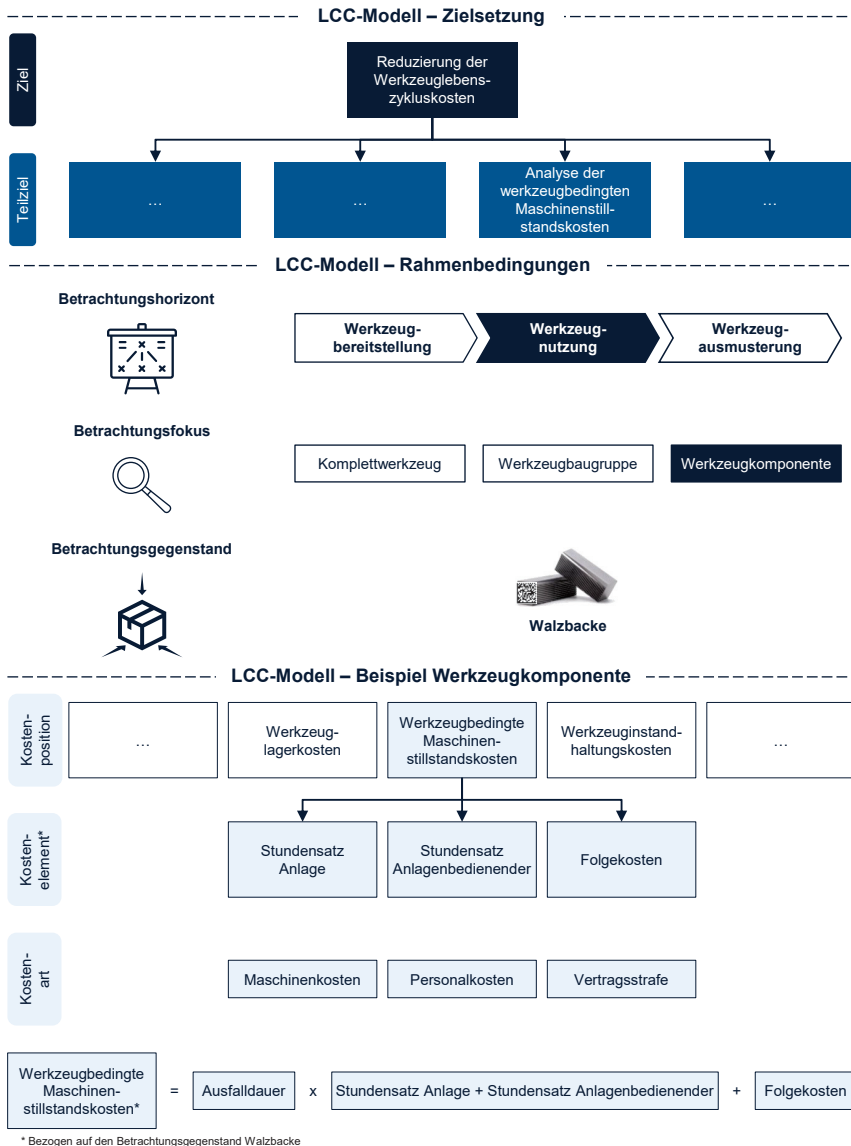
Im Anschluss kann auf Basis der definierten Kostenelemente das LCC-Modell entwickelt werden. Übergeordnet ist es wichtig, dass das LCC-Modell immer wieder an sich ändernde Rahmenbedingungen angepasst wird, um die Realität möglichst authentisch digital abzubilden. Da der Aufwand für die LCC-Betrachtung im Regelfall mit der Anzahl der berücksichtigten Kostenelemente steigt, sollten insbesondere die Elemente berücksichtigt werden, die einen deutlichen Einfluss auf die Gesamtkosten haben und beeinflussbar sind.⁵³⁸ Die Umsetzung des LCC-Modells kann auch schrittweise erfolgen, um die Komplexität besser beherrschbar zu gestalten. Dieser Punkt sollte bei der Entwicklung eines Soll-Zustands für die zukünftige Erfassung der Werkzeugkostenfaktoren berücksichtigt werden.

Die Aufnahme des Ist-Zustands bzgl. der systemseitig zur Verfügung stehenden Kostenfaktoren sowie der Vergleich mit dem entwickelten Soll-Zustand und die Ableitung eines anforderungsgerechten Erfassungskonzepts wird in Kapitel 5.2.1 betrachtet. Die weitere Detaillierung der benötigten Werkzeugkostenfaktoren auf Basis der Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten sowie der darauf aufbauenden Use Cases wird in Kapitel 5.2.2 bzw. in Kapitel 5.2.3 vorgestellt. Für ein besseres Verständnis ist in Abbildung 93 ein Beispiel für die Erstellung eines LCC-Modells abgebildet. Zunächst ist das übergeordnete Ziel sowie ein spezifisches Teilziel dargestellt. Im zweiten Teil der Abbildung sind der Betrachtungshorizont, der Betrachtungsfokus sowie der Betrachtungsgegenstand abgebildet. Abschließend werden die notwendigen Kostenpositionen, Kostenelemente und Kostenarten an einem Beispiel erläutert.

⁵³⁶ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 14.

⁵³⁷ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3), 2005, S. 14.

⁵³⁸ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12), 2005, S. 11.

Abbildung 93: LCC-Modell – Zielsetzung, Rahmenbedingung, Umsetzung⁵³⁹

Werkzeugdaten

Für die Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten ist es notwendig, dass neben den Kosten auch die dazugehörigen Einflussgrößen aufgenommen werden. Somit ist es möglich, deren Wirkung auf die Höhe der Werkzeugkosten quantifizieren und Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Kostenbeeinflussung ableiten zu können. Wie bereits zuvor in den Kapiteln 2.1.3 und 5.1.2 erwähnt, werden im Werkzeugbau ausschließlich Hohlformwerkzeuge hergestellt. Charakteristisch ist die teilweise oder vollständige Abbildung der Werkstückform auf der Werkzeuggeometrie.⁵⁴⁰ Zur Betriebsumgebung während der Werkzeugnutzungsphase zählen die Maschine oder Anlage, auf der das Werkzeug betrieben wird, das Rohmaterial, das für die Herstellung des Endprodukts mithilfe des formgebenden Werkzeugs benötigt wird, das hergestellte Endprodukt, das das Ergebnis des formgebenden Prozesses ist, sowie die jeweilige Zusammensetzung des Werkzeugs aus einzelnen Werkzeugkomponenten und Baugruppen zum jeweiligen Produktionszeitpunkt.

Während der Werkzeugbereitstellung ist die übergeordnete Betriebsumgebung der herstellende Werkzeugbau. Basierend auf der in Kapitel 2.1.4 erläuterten und in Abbildung 8 dargestellten Prozesskette des Werkzeugbaus zählen zur detaillierten Betriebsumgebung das Rohmaterial, das für die Herstellung des Werkzeugs benötigt wird, die von der Arbeitsvorbereitung gewählte Technologiekette, die für die Bearbeitung des Rohmaterials eingesetzten Bearbeitungsmaschinen, die Maschine oder Anlage, auf der die Reifmachung des Werkzeugs stattfindet, die Montage und Anpassung durch den durchführenden Mitarbeitenden und die Art und Anzahl der notwendigen Korrekturschleifen während der Erstellung und Reifmachung.

Je nach gewählter Zielsetzung können alle oder nur einzelne der angeführten Aspekte der Betriebsumgebung des Werkzeugs während der Werkzeugnutzungsphase berücksichtigt werden. Abhängig vom Werkzeugtyp kann die zu berücksichtigende Betriebsumgebung variieren. Für die erste Identifizierung der zu erfassenden Werkzeugdaten als Basis für die Entwicklung einer initialen Werkzeugakte eignet sich die Anwendung des Ursache-Wirkungs-Diagramms, das nachfolgend kurz vorgestellt wird. Die weitere Detaillierung der benötigten Werkzeugdaten auf Basis der Analyse der Werkzeuglebenszyklusdaten sowie der darauf aufbauenden Use Cases wird in Kapitel 5.2.2 bzw. 5.2.3 beschrieben.

Mithilfe des Ursache-Wirkungs-Diagramms, das auch Ishikawa-Diagramm oder Fischgräten-Diagramm genannt wird, können komplexe Ursache-Wirkungs-Beziehung ermittelt und visualisiert werden. In der Form einer Fischgräte zeigen die Hauptursachengruppen auf die Hauptursache am rechten Pfeilende. Die problemrelevanten Ursachen werden in Haupt- und Nebenursachen zerlegt und entsprechend der Kategorie graphisch strukturiert visualisiert. Somit können systematisch Einflüsse identifiziert und ihre Abhängigkeiten zum Problem visualisiert werden.⁵⁴¹ Der Ursprung des Ishikawa-Diagramms geht auf KAORU ISHIKAWA zurück. Für weitergehende Informationen wird auf sein Buch Guide to quality control verwiesen.⁵⁴²

⁵⁴⁰ Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 25.

⁵⁴¹ Vgl. Brunner; Wagner (Qualität in der Herstellung), 2016, S. 202-203.; Vgl. Kamiske; Brauer (Qualitätsmanagement von A bis Z), 1999, S. 40-41.

⁵⁴² Vgl. Ishikawa (Guide to quality control), 1981.

Im Anwendungszusammenhang kann eine mögliche Problemstellung beispielsweise „Standmengenschwankungen“ bzw. „Standzeitschwankungen“ sein. Gemeinsam im multidisziplinären Team werden entsprechend die Ursachen für Schwankungen der Standmengen bzw. Standzeiten von Komplettwerkzeugen, Werkzeugbaugruppen oder Werkzeugkomponenten identifiziert und im zweiten Schritt die dahinterliegenden Werkzeugdaten abgeleitet. Die Anwendung des Ursache-Wirkungs-Diagramms sollte durch die verschiedenen Prozessexperten einer oder mehrerer Lebenszyklusphasen erfolgen, um die spezifischen Werkzeugdaten zu identifizieren. Analog zu den Werkzeuglebenszykluskosten gilt auch hier der Grundsatz, dass die Komplexität und der Aufwand mit jeder weiteren Einflussgröße zunehmen. Der Fokus sollte daher auf die Einflussgrößen mit signifikanter Wirkung auf die Werkzeugqualität und Werkzeugzuverlässigkeit gelegt werden. Dieser Zusammenhang sollte bei der Entwicklung eines Soll-Zustands für die zukünftige Erfassung der Werkzeugdaten berücksichtigt werden. Die Aufnahme des Ist-Zustands bzgl. der systemseitig zur Verfügung stehenden Werkzeugdaten sowie der Vergleich mit dem entwickelten Soll-Zustand und die Ableitung eines anforderungsgerechten Erfassungskonzepts wird in Kapitel 5.2.1 betrachtet. Die weitere Detaillierung der benötigten Werkzeugdaten auf Basis der Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten sowie der darauf aufbauenden Use Cases ist Teil von Kapitel 5.2.2 bzw. 5.2.3.

Sobald die entsprechenden Werkzeugdaten und die Einflussgrößen definiert worden sind, empfiehlt es sich, das Ergebnis in eine strukturierte Darstellung zu überführen. In der nachfolgenden Abbildung 94 ist das beispielhafte Ergebnis eines Ursache-Wirkungs-Diagramms zur Streuung von Standmengen/-zeiten eines Werkzeugtyps dargestellt.

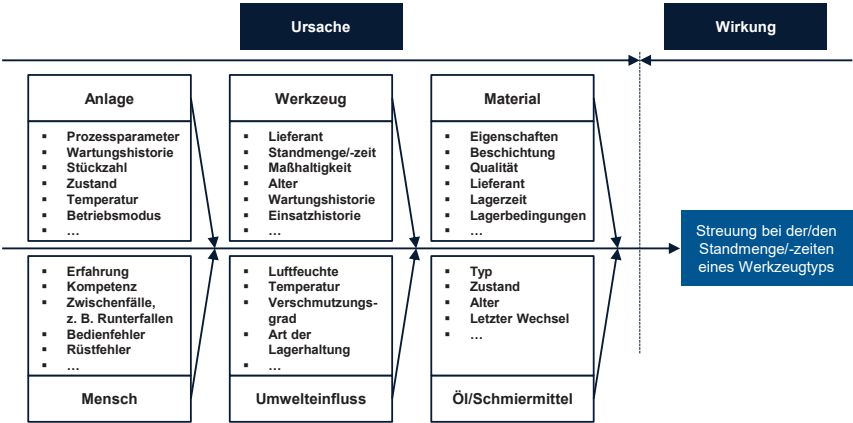


Abbildung 94: Ursache-Wirkungs-Diagramm zur Streuung bei Standmengen/-zeiten⁵⁴³

Wenn die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge identifiziert worden sind, erfolgt im darauffolgenden Schritt für jede einzelne Ursache die Zuordnung der jeweiligen Datenkategorie der Betriebsdatenumgebung. Dazu werden die einzelnen Ursachen auf die zugrundeliegenden

⁵⁴³ Eigene Darstellung

Daten zurückgeführt und entsprechend der jeweiligen Datenkategorie der Betriebsdatenumgebung zugeteilt. In der nachfolgenden Abbildung 95 ist beispielhaft abgebildet, wie die zur Problemlösung notwendigen Daten den jeweiligen Datenkategorien der Betriebsdatenumgebung zugeordnet werden können.



Abbildung 95: Beispiel Werkzeugdaten – Streuung bei Standmengen/-zeiten eines Typs⁵⁴⁴

Zusammenfassend wird in diesem Unterkapitel die Identifikation der notwendigen Werkzeugkostenfaktoren und Werkzeugdaten erläutert und an Beispielen demonstriert. Die Auswahl der jeweiligen Daten unterliegt dabei der zuvor definierten Zielsetzung, den zu betrachtenden Werkzeuglebenszyklusphasen sowie den gesetzten Randbedingungen. Im nächsten Unterkapitel folgt die Zuordnung der benötigten Datenquellen.

5.1.4 Zuordnung benötigter Datenquellen

Aufbauend auf den zuvor definierten Werkzeugkostenfaktoren und Werkzeugdaten folgt die Zuordnung der dazu benötigten Datenquellen. Dazu werden die zuvor erstellten strukturierten Darstellungen der Werkzeugkostenfaktoren und Werkzeugdaten entsprechend um das zugrundeliegende System ergänzt. In der nachfolgenden Abbildung 96 sind für das Beispiel des LCC-Modells die entsprechenden Datenquellen abgebildet.

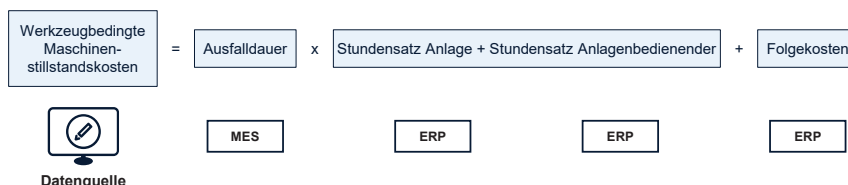


Abbildung 96: Beispiel LCC-Modell – Zuordnung Datenquellen⁵⁴⁵

544 Eigene Darstellung

545 Eigene Darstellung

Für ein besseres Verständnis wird die Zuordnung der Datenquellen auch für den zweiten Bereich der Werkzeuglebenszyklusdaten vorgestellt. Dazu wird erneut auf das Beispiel zur Streuung der Standmengen/-zeiten eines Werkzeugtyps zurückgegriffen. In der nachfolgenden Abbildung 97 ist dargestellt, welche Datenquellen den jeweiligen Datenkategorien der Betriebsdatenumgebung zugrunde liegen.

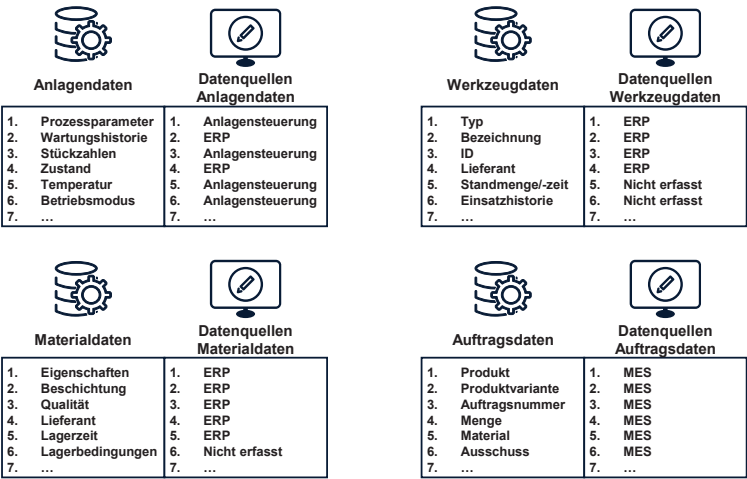


Abbildung 97: Beispiel Werkzeugdaten – Zuordnung Datenquellen⁵⁴⁶

Die identifizierten Systeme für die Erfassung der Werkzeugkostenfaktoren und Werkzeugdaten können anschließend in einer Systemübersicht dargestellt werden, um die Diversität der benötigten Quellen abschätzen und darauf aufbauend die Kritikalität des jeweiligen Systems für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse bewerten zu können. Dazu können die benötigten Systeme wie in der nachfolgenden Abbildung 98 dargestellt werden.

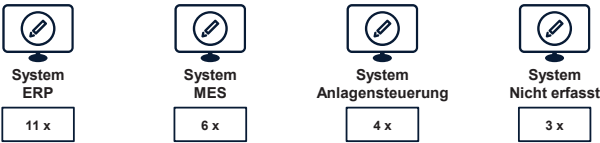


Abbildung 98: Systemübersicht für das Beispiel Werkzeugdaten⁵⁴⁷

Im zweiten Schritt wird die Kritikalität jedes Systems bezogen auf die zuvor definierte Zielsetzung bewertet, um die verschiedenen Systeme untereinander priorisieren zu können. Dazu wird mit den jeweiligen fachlichen und kaufmännischen Experten bewertet, wie groß der Nutzen der durch die jeweilige Quelle bereitgestellten Daten bezogen auf die zuvor definierte Zielsetzung ist. Für die Bewertung eignet sich beispielweise eine drei-stufige Bewertungsskala in

⁵⁴⁶ Eigene Darstellung

⁵⁴⁷ Eigene Darstellung

Form einer Ampel. In der nachfolgenden Abbildung 99 ist die Systemübersicht inklusive der Kritikalität der Informationen für das Beispiel Werkzeugdaten dargestellt.

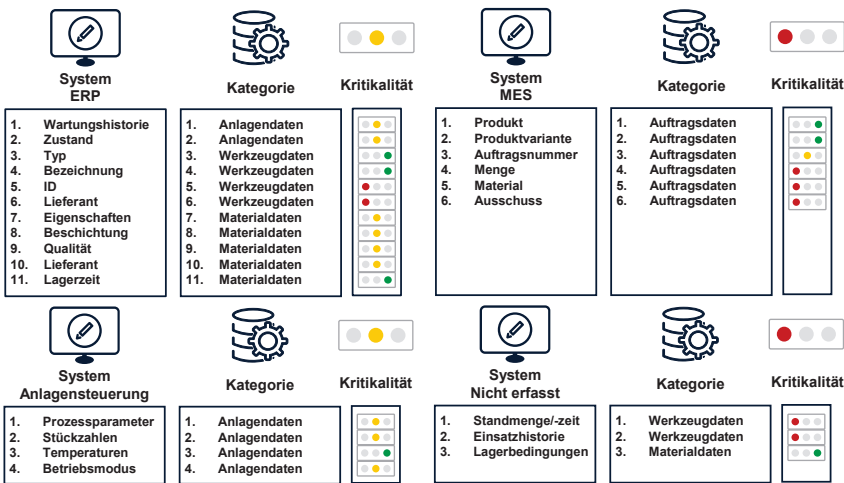


Abbildung 99: Systemübersicht inklusive Kritikalität⁵⁴⁸

Auf Basis der Bewertung kann die Kritikalität bzw. der Nutzen der Systeme priorisiert werden. Das Ergebnis der Priorisierung ist relevant für die Reihenfolgenfestlegung der Systemverknüpfung zu einer Digitalen Werkzeugakte. Auf die Identifizierung und Priorisierung der benötigten Datenquellen folgt die Ableitung einer anforderungsgerechten Datenstruktur.

5.1.5 Ableitung einer anforderungsgerechten Datenstruktur

Auf Basis der zuvor ermittelten notwendigen Werkzeugkostenfaktoren und Werkzeugdaten kann nun die initiale Ableitung einer anforderungsgerechten Datenstruktur als Basis für die Digitale Werkzeugakte erfolgen. Wie bereits in Kapitel 5.1.2 erwähnt, besteht die Zielsetzung von Kapitel 5.1 darin, aufzuzeigen, was die konstitutiven Elemente für die Erarbeitung einer initialen modularen und erweiterbaren Datenstruktur für die werkzeuglebenszyklusbegleitende Datenaufnahme sind. Die weitere Detaillierung und Erweiterung der initialen Datenstruktur auf Basis der Anforderungen der Datenanalyse oder Use Cases, die auf der Digitalen Werkzeugakte basieren und ggf. eine Ergänzung der Datenstruktur erfordern, werden in den Kapiteln 5.2.2 und 5.2.3 behandelt.

Für die Entwicklung der Datenstruktur wird die in Kapitel 2.3.2.4 erläuterte Methodik von HAHNE⁵⁴⁹ angewendet. Es wird jedoch nur die logische und nicht die semantische Ebene betrachtet, da die zugrundeliegenden Systeme im Normalfall bereits bestehen und daher nur eine Neustrukturierung der Daten notwendig ist. Die physische Ebene bildet die zu nutzende

⁵⁴⁸ Eigene Darstellung

⁵⁴⁹ Vgl. Hahne (Logische Modellierung mehrdimensionaler Datenbanksysteme), 2002, S. 9.

Anwendungssoftware selbstständig ab. Im Falle von Problemen in Bezug auf die Geschwindigkeit der Anwendung muss diese Ebene jedoch auch betrachtet werden.

Für die Modellierung der Datenstruktur wird das relationale Datenmodell gewählt, da es weitverbreitet und der Standard für Anwendungssoftware ist.⁵⁵⁰ Das Relationenmodell nach Codd kann auf das Jahr 1970 zurückgeführt werden.⁵⁵¹ Für ein besseres Verständnis werden zunächst die einzelnen Modellelemente und die verschiedenen Beziehungstypen zwischen Datensätzen vorgestellt. Es folgt eine Erklärung der genauen Vorgehensweise der Datenmodell- und Visualisierungsentwicklung.

Im Relationenmodell werden Daten in Tabellen in sogenannten Relationen strukturiert. Jede Relation setzt sich aus Elementen aus den folgenden Modellierungsbausteinen zusammen: Attribute, Attributwerte, Tupel, Primärschlüssel und Fremdschlüssel.⁵⁵² In Abbildung 100 ist eine beispielhafte Relation Werkzeuge dargestellt. Attribute sind die Spaltennamen der Tabelle und Attributwerte die einzelnen Ausprägungen. Tupel sind Zeilen und werden in Anlehnung an das weit verbreitete Entity-Relationship-Modell oft auch Entitäten genannt.⁵⁵³ Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Begriff Tabelle für Relation und Zeile für Tupel verwendet. Ein Attribut ist als Primärschlüssel definiert, wenn dessen Attributwerte Zeilen eindeutig identifizieren. Es darf in einem Primärschlüssel also kein Attributwert doppelt existieren⁵⁵⁴.

Werkzeuge			
Materialnummer	Bezeichnung	Lagerort	Preis [€]
101	Stempel	Zentrallager	200
367	Matrize	Werkzeuglager	300
501	Umformstufe 1	Werkzeuglager	5000
940	Ausstoßnadel	Werkzeugbau	250

Abbildung 100: Relation Werkzeuge⁵⁵⁵

Zwischen Tabellen können Beziehungen bestehen. Die Tabelle Werkzeug kann z. B. mit einer Tabelle von Fertigungsaufträgen dadurch verknüpft sein, dass Werkzeuge für die Fertigung genutzt werden. Es gibt vier verschiedene Beziehungstypen, die auch als Kardinalitäten bezeichnet werden, und nachfolgend aufgelistet sind:⁵⁵⁶

- (1:1)-Beziehung: Jede Zeile der ersten Tabelle ist genau mit einer Zeile einer zweiten Tabelle verknüpft. Beispielsweise ist jedem Produkt genau eine Stückliste und jeder Stückliste genau ein Produkt zugeordnet.
- (1:m)-Beziehung: Jede Zeile der ersten Tabelle ist mit ein oder mehreren Zeilen einer zweiten Tabelle verknüpft. Jede Zeile der zweiten Tabelle ist genau mit einer Zeile der

⁵⁵⁰ Vgl. Abts; Müller (Grundkurs Wirtschaftsinformatik), 2017, S. 169.

⁵⁵¹ Vgl. Codd (A relational model of data for large shared data banks), 1970.

⁵⁵² Vgl. Meier (Relationale und postrelationale Datenbanken), 2007, S. 16-17.

⁵⁵³ Vgl. Chen (The entity-relationship model - toward a unified view of data), 1976, S. 11.

⁵⁵⁴ Vgl. Codd (A relational model of data for large shared data banks), 1970, S. 380.

⁵⁵⁵ Eigene Darstellung

⁵⁵⁶ Vgl. Kelzenberg (Datenstrukturmodell für den digitalen Schatten), 2020, S. 182.

ersten Tabelle verknüpft. Beispielsweise können Produkte mehreren Fertigungsaufträgen zugeordnet sein, jedoch ist jeder Fertigungsauftrag nur einem Produkt zugeordnet.

- (1:m)-Beziehungen werden auch als Parent-Child-Beziehung (engl. Eltern-Kind-Beziehung) bezeichnet. In dem genannten Beispiel wäre die Relation Produkt der Parent, und die Relation Fertigungsauftrag das Child.⁵⁵⁷
- (n:m)-Beziehung: Jede Zeile der ersten Tabelle ist mit ein oder mehreren Zeilen einer zweiten Tabelle verknüpft und umgekehrt. Beispielsweise kann ein Werkzeug in mehreren Fertigungsaufträgen genutzt werden und ein Fertigungsauftrag benötigt mehrere Werkzeuge.

In (1:m)-Beziehungen werden die Tabellen mittels Zuordnung vom Primärschlüssel der Parent-Tabelle zum sogenannten Fremdschlüssel der Child-Tabelle verknüpft. Der Fremdschlüssel der Child-Tabelle enthält dabei nur Attributwerte, die auch der Primärschlüssel der Parent-Tabelle enthält.⁵⁵⁸ Die Attributwerte des Fremdschlüssels müssen jedoch nicht zwangsweise eindeutig sein, im Gegensatz zum Primärschlüssel. Falls die Attributwerte des Fremdschlüssels eindeutig sind, handelt es sich um eine (1:1)-Beziehung.

Es ist zu beachten, dass (n:m)-Beziehungen im relationalen Modell nicht zulässig sind, sondern aufgelöst werden müssen. Im oben erläuterten Beispiel der Verknüpfung von Werkzeugen mit Fertigungsaufträgen ist das nötig und kann durch „Zwischenschieben“ einer Tabelle erreicht werden, welche die beiden Primärschlüssel der zu verknüpfenden Tabelle als Fremdschlüssel enthält.⁵⁵⁸ In dem konkreten (n:m)-Beziehungs-Beispiel, der Verknüpfung von einer Tabelle mit Werkzeugen und einer Tabelle mit Fertigungsaufträgen, würde es das „Zwischenschieben“ einer Tabelle mit Werkzeugnummern und mit Fertigungsauftragsnummern bedeuten. In der zwischengeschobenen Tabelle können dieselben Werkzeugnummern und Fertigungsauftragsnummern wiederholt auftauchen. Im weiteren Verlauf wird die nachfolgende Notation in Anlehnung an ABTS UND MÜLDER⁵⁵⁹ verwendet, um die Tabellen und deren Struktur einfacher beschreiben zu können:

Tabellenname (Primärschlüssel, *Fremdschlüssel*, Attribut A, Attribut B, ...).

Mit Pfeilen wird die Verbindung zwischen Tabellen hergestellt und der Beziehungstyp genannt. Das oben erläuterte Beispiel ist in Abbildung 101 abgebildet.

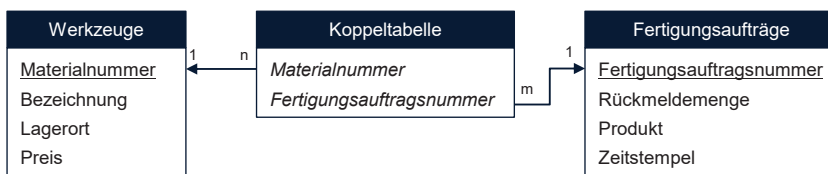


Abbildung 101: Notation Relationenmodell⁵⁶⁰

⁵⁵⁷ Vgl. Bellatreche; Mohania (Data Warehousing and Knowledge Discovery), 2014, S. 50.

⁵⁵⁸ Vgl. Abts; Mülder (Grundkurs Wirtschaftsinformatik), 2017, S. 168-171.

⁵⁵⁹ Vgl. Abts; Mülder (Grundkurs Wirtschaftsinformatik), 2017, S. 170.

⁵⁶⁰ i.A.a. Abts; Mülder (Grundkurs Wirtschaftsinformatik), 2017, S. 170.

Nach der Erläuterung der theoretischen Grundlagen des Relationenmodells folgt die generelle Vorgehensweise zur Entwicklung der Datenstruktur. Die vier Schritte sind in Abbildung 102 dargestellt. Zuerst werden von den nötigen Datenquellen Datenauszüge extrahiert bzw. von den Softwareexperten angefordert. Als Zeitraum wird je nach Datenumfang ein Jahr oder ein Geschäftsjahr empfohlen, um auf eine ausreichende und plausible Datenbasis aufzubauen.

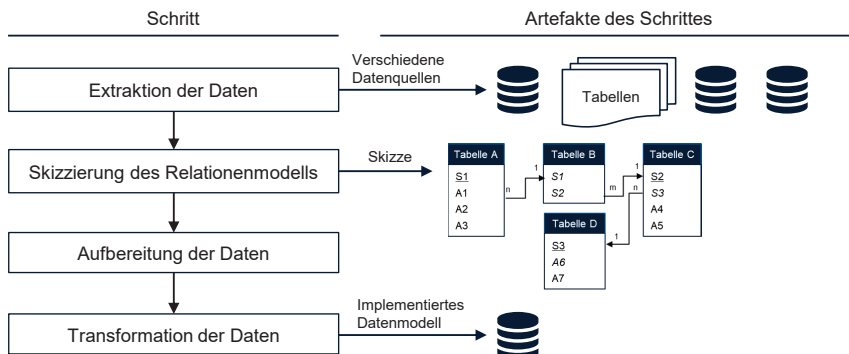


Abbildung 102: Vorgehen Datenstrukturentwicklung⁵⁶¹

Auf Basis dieser Daten kann ein relationales Datenmodell nach Vorbild von Abbildung 101 skizziert werden. Die Beziehungen zwischen verschiedenen Tabellen müssen definiert werden. Falls (n:m)-Kardinalitäten auftauchen, müssen sie durch Hinzufügen von neuen Tabellen in (1:m)-Beziehungen umgewandelt werden. Zudem ist es zu empfehlen, zwei Tabellen mit (1:1)-Beziehungen in eine Tabelle zu integrieren, da so die Geschwindigkeit des Tools erhöht werden kann. Ferner können bei Bedarf bei (1:m)-Beziehungen ausgewählte Attribute der Child-Tabelle oder die ganze Child-Tabelle in die Parent-Tabellen aggregiert werden. Das bietet sich an, falls die Granularität der Child-Tabelle zu fein für die gewünschte Applikation ist und eine Aggregation der Daten auf der Parent-Ebene ausreicht. Falls die Geschwindigkeit der Anwendung gering ist, kann die Child-Tabelle aus dem Modell sogar ganz entfernt werden. Die Aggregation der Attribute der Child-Tabelle kann über verschiedene Funktionen erfolgen. Oft genutzt sind Summen-, Durchschnitts-, Anzahl- und Standardabweichungsfunktionen für numerische Attribute und für Text-Attribute die Auswahl des letzten oder ersten Elements. Darüber hinaus gibt es noch viele weitere Aggregationsfunktionen. Ein Beispiel für eine Aggregation ist die Berechnung der Standmenge eines Werkzeugs auf Basis der Tabellen in Abbildung 101. Für die Berechnung kann beispielsweise eine Aufsummierung der Rückmeldemengen über alle relevanten Fertigungsaufträge erfolgen. Auf die beiden Schritte Aufbereitung sowie Transformation der Daten wird in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 eingegangen.

Für ein besseres Verständnis der Thematik wird abschließend ein Beispiel inklusive eines Testdatensatzes vorgestellt. Die Ausgangssituation des Testunternehmens lautet wie folgt.

⁵⁶¹ Eigene Darstellung

Der Anteil der Werkzeugkosten an den Produktionskosten belief sich in der Betrachtungsperiode auf ca. 15 %. Die Lagerreichweite betrug im Durchschnitt 20 Monate. Werkzeugstandmengen werden nur sporadisch erfasst und nicht systematisch ausgewertet. Um die Werkzeugproduktivität zu erhöhen und den Lagerbestand zu verringern, wird ein internes Projekt mit der Zielsetzung gestartet, die Werkzeugstandzeiten digital zu erfassen, Ursache-Wirkzusammenhänge zu identifizieren und die Werkzeuglebenszykluskosten langfristig zu senken.

Die Rahmenbedingungen sind wie folgt definiert. Der Betrachtungshorizont ist die Werkzeugbereitstellungs- und -nutzungsphase, der Betrachtungsfokus ist die Werkzeugkomponente und der Betrachtungsgegenstand sind ausgewählte Aktivteile bestimmter Werkzeugtypen. Im Folgenden wird der Testdatensatz sowie einige Besonderheiten erläutert. Für den Testdatensatz wird die Abkürzung FHMI für Fertigungshilfsmittel und FA für Fertigungsauftrag genutzt. Zur Erstellung des Datenmodells werden zudem die folgenden Datensätze verwendet: Produktstammdaten, tägliche FHMI-Bestände, Fertigungsaufträge und Rückmeldungen, FHMI-Fertigungsaufträge und Rückmeldungen, FHMI-Stammdaten, FHMI-Einkaufsdaten, Qualitätsdaten und Maschinenstillstände. Die FHMI-Fertigungsaufträge sind Fertigungsaufträge einer internen Werkzeugbauabteilung. Auf Basis der genannten Rahmenbedingungen wird die in Abbildung 103 dargestellte Datenstruktur entwickelt. Auffällig sind die beiden Koppeltabellen Werkzeuginstanz-FA-Zuordnung und Werkzeuginstanz-FHMI-FA-Zuordnung. Die Werkzeuginstanzen können in diesem Beispiel nicht direkt per Werkzeuginstanz-Fremdschlüssel mit der Fertigungsauftragstabelle verknüpft sein, da mehrere Werkzeuge in einem Fertigungsauftrag und ein Werkzeug in verschiedenen Fertigungsaufträgen genutzt werden kann. Es liegt somit eine (n:m)-Kardinalität vor, die durch das Zwischenschieben eben dieser Koppeltabellen aufgelöst wird. Ferner wird beim Entwickeln des Datenmodells auf das Verhindern von Zirkelbezügen geachtet, da dies zu unvorhersehbarem Verhalten bei Datenabfragen führen würde. Zirkelbezüge liegen vor, falls eine Tabelle über mehrere Wege mit einer anderen Tabelle verbunden ist. Nachfolgend werden die Tabellen Werkzeuginstanz, Werkzeuginstanz-FA-Zuordnung sowie Werkzeuginstanz-FHMI-FA-Zuordnung erläutert:

- Werkzeuginstanzen: Dies ist eine Tabelle mit einzelnen Werkzeuginstanzen. Unter jedem Werkzeugtyp sind jeweils einzelne Instanzen aufgeführt.
- Werkzeuginstanz-FA-Zuordnung: In diesem besonderen Setting ist diese Zwischentabelle nötig, um die Werkzeuge den entsprechenden Fertigungsaufträgen zuzuordnen. Die Werkzeuginstanzen werden dafür über die FHMI-Materialnummer mit den Fertigungsaufträgen anhand der Produktmaterialnummer verknüpft.
- Werkzeuginstanz-FHMI-FA-Zuordnung: Diese Tabelle verknüpft die Werkzeuginstanzen mit den jeweiligen FHMI-Fertigungsaufträgen. Die Zuordnung der Werkzeuginstanzen erfolgt über die FHMI-Materialnummer des gefertigten Werkzeugs.

Ferner werden die Rückmeldungen der Fertigungsaufträge inklusive der Kostenarten Maschinen-, Personal- und Rüstkosten in die Fertigungsauftragstabellen aggregiert und die FHMI-Einkaufsdaten mit Attributen wie eingekaufte Stückzahl oder Einkaufspreis in die FHMI-

Stammdatentabelle integriert. In der täglichen FHMI-Lagerbestandstabelle wird der durchschnittliche tägliche Lagerbestand über ein Jahr berechnet und dann in die FHMI-Stammdatentabelle integriert.

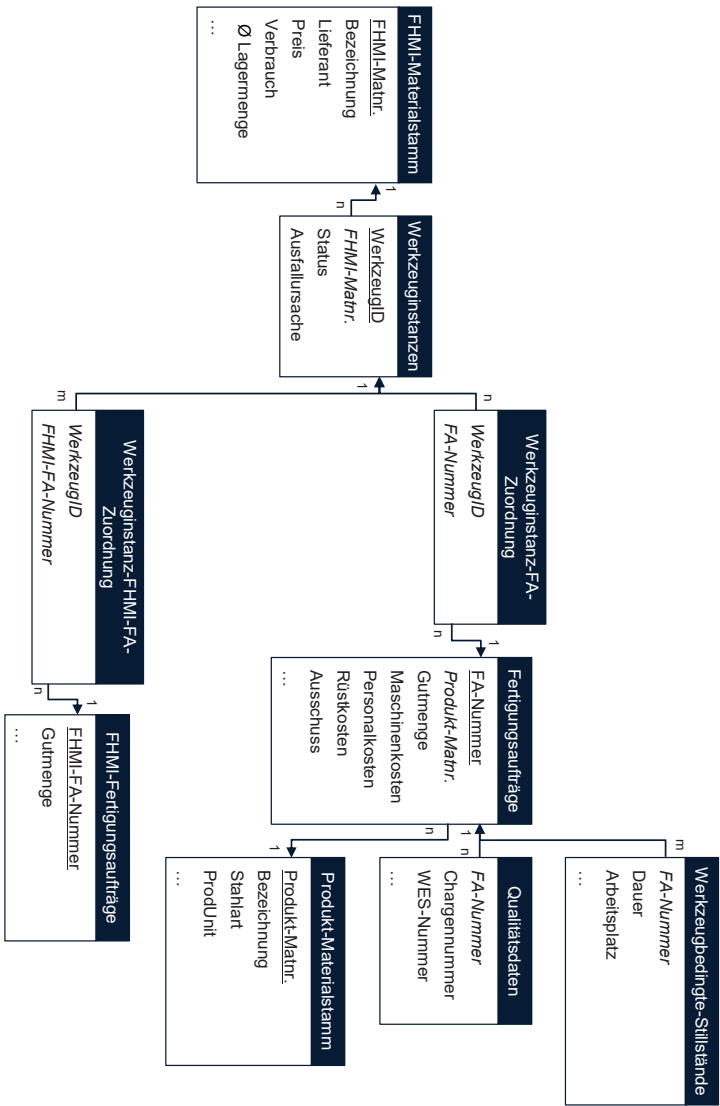


Abbildung 103: Beispielhafte Datenstruktur⁵⁶²

⁵⁶² Eigene Darstellung

5.2 Aktivitätselemente

Die erfolgreiche Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse basiert auf einer operativen Umsetzung einer werkzeuglebenszyklusübergreifenden Datenerfassung, einer anforderungsgerechten Datenanalyse und -auswertung sowie der Entwicklung und Anwendung weiterer Anwendungen, die auf Werkzeuglebenszyklusdaten sowie -kosten basieren und mit der Zielsetzung angewendet werden, die Werkzeugkosten je produziertem Teil bzw. die Werkzeuglebenszykluskosten nachhaltig zu senken und den Werkzeugeinsatz zu optimieren. Dazu werden nachfolgend die drei eingeführten Aktivitätselemente Instanzbasierte Datenerfassung, Bauteilspezifische Datenanalyse und Datenbasierte Use Cases vorgestellt.

5.2.1 Instanzbasierte Datenerfassung

Die operative Umsetzung einer werkzeuglebenszyklusübergreifenden Datenerfassung ist ein befähigendes Element für die erfolgreiche Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Basierend auf der entwickelten Digitalen Werkzeugakte wird ein anforderungsgerechter Ansatz für die teilautomatisierte Erfassung der Werkzeugkosten und -daten benötigt. Da die für die Werkzeuglebenszykluskostenanalyse benötigten Daten ihren Ursprung in unterschiedlichen Unternehmen oder Abteilungen eines Unternehmens sowie unterschiedlichen Systemen haben und die Datenmenge insbesondere auf Instanzebene über den gesamten Werkzeuglebenszyklus sehr groß werden kann, sind die in Kapitel 2.3.1.1 aufgeführten Eigenschaften von Big Data bei der Umsetzung einer instanzbasierten Datenerfassung zu adressieren. Zudem steigt die Komplexität der Datenerfassung und -abbildung, wenn wie in dem in Kapitel 5.1.5 angeführten Beispiel mehrere Werkzeuge in einem Fertigungsauftrag und ein Werkzeug bzw. die gleichen Werkzeugkomponenten in unterschiedlich zusammengesetzten Baugruppen in verschiedenen Fertigungsaufträgen genutzt werden.

Für eine aussagekräftige bauteilspezifische Datenanalyse ist es notwendig, zu jedem Zeitpunkt t_i die genaue Zusammenstellung einer Baugruppe bzw. eines Werkzeugs zu kennen. Es wird folglich für jeden Zeitpunkt t_i eine digitale Abbildung des Zusammenbaus des Werkzeugs bzw. der Baugruppe benötigt. Darüber hinaus ist als Input für die bauteilspezifische Datenanalyse ein voranalysierter und bereinigter Datensatz notwendig.⁵⁶³ Da der Aufwand der Datenvorbereitung bis zu 70 % des Gesamtaufwands eines Projekts betragen kann, ist ein Erfolgsfaktor die Sicherstellung einer guten Datenqualität bereits während der Erfassung, um den Aufwand für die nachfolgende Datenbereinigung möglichst gering zu halten.⁵⁶⁴

Nachfolgend werden dazu die einzelnen Gestaltungsaspekte einer instanzbasierten Datenerfassung erläutert. Zunächst ist dazu die Identifikation der einzelnen Prozessschritte zur Aufnahme der Werkzeugdaten und -kosten entlang des Werkzeuglebenszyklus notwendig. Darauf folgt die Identifikation von möglichen Fehlerquellen bei der Datenerfassung innerhalb einzelner Prozessschritte sowie im Anschluss die Ableitung von Anforderungen an die digitale instanzbasierte Datenerfassung entlang des Werkzeuglebenszyklus. Abschließend folgt die

⁵⁶³ Vgl. Benning; Wenger (Smart-Data-Management), 2022, S. 198-199.

⁵⁶⁴ Vgl. Rollins (Foundational Methodology for Data Science), 2015, S. 1-6.

Entwicklung eines instanzbasierten Erfassungskonzepts zur Sicherstellung eines stabilen Erfassungsprozesses entlang des Lebenszyklus. Das Ergebnis des Gestaltungselements ist ein anforderungsgerechter Ansatz zur teilautomatisierten Erfassung der Werkzeugkosten und -daten. Die Gestaltungsaspekte des Gestaltungselements Instanzbasierte Datenerfassung sind in Abbildung 104 dargestellt.

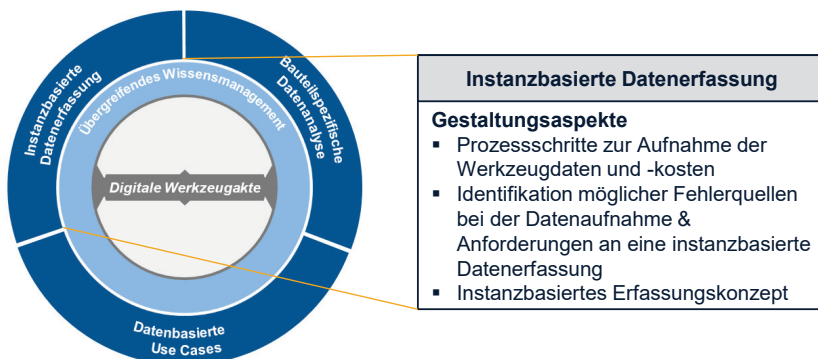


Abbildung 104: Aspekte des Gestaltungselements Instanzbasierte Datenerfassung⁵⁶⁵

5.2.1.1 Grundlagen

Die methodische Grundlage für dieses Kapitel basiert auf unterschiedlichen Teilaspekten, die nachfolgend eingeführt werden. Die Gewinnung von Prozesswissen mit Hilfe einer systematischen Datenanalyse basiert auf der Sammlung und Verknüpfung von Informationen aus unterschiedlichen Quellen. Dazu ist es notwendig, die gewünschten Informationen aus den zugrundeliegenden Daten zu gewinnen. Die Grundlage der wertschöpfenden Modellbildung für eine zielführende Datenanalyse sind entsprechend Daten. Insbesondere große Datenmengen können dabei anhand der in Kapitel 2.3.1.4 vorgestellten fünf Vs Volume, Variety, Velocity, Veracity sowie Value charakterisiert und diskutiert werden.⁵⁶⁶ Insbesondere bei heterogenen Datenquellen und verschiedenen Informationsnutzern ist eine hohe Daten- bzw. Informationsqualität die Grundvoraussetzung für eine mehrwertstiftende Nutzung der Daten. Dazu ist die Bewertung der Informationsqualität notwendig.⁵⁶⁷ Nach GEBAUER und WINDHEUSER kann die Datenqualität als die „Gesamtheit der Ausprägungen von Qualitätsmerkmalen eines Datenbestands bezüglich dessen Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen“ definiert werden.⁵⁶⁸ Nach VDI-NORM 3714 beschreibt der Begriff Datenqualität die individuellen Eigenschaften eines Datenbestands. Der Übereinstimmungsgrad dieser Eigenschaften mit den für die Datenanalyse festgesetzten Anforderungen ergibt den Eignungsgrad der Daten für das definierte Projektziel. Die Datenqualität kann entsprechend nur im Zusammenhang mit der

⁵⁶⁵ Eigene Darstellung

⁵⁶⁶ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 3714 - Blatt 2), 2022, S. 3-4.

⁵⁶⁷ Vgl. Rohweder et al. (Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe), 2021, S. 23.; Vgl. Lee et al. (Journey to data quality), 2006, S. 13.; Vgl. Lee et al. (Journey to data quality), 2006, S. 27.

⁵⁶⁸ Vgl. Gebauer; Windheuser (Strukturierte Datenanalyse, Profiling und Geschäftsregeln), 2021, S. 88.

Datennutzung und Datenerzeugung beurteilt werden.⁵⁶⁹ Nur wenn die Inputdaten der geforderten Informationsqualität entsprechen, können mithilfe der Datenanalyse belastbare Ergebnisse erzielt werden. In Anlehnung an die VDI/VDE-Richtlinie 3714 Implementierung und Betrieb von Big-Data-Anwendungen in der produzierenden Industrie⁵⁷⁰ sowie GRABERG⁵⁷¹ werden nachfolgend die notwendigen Grundlagen für die Formulierung der geforderten Informationsqualität sowie der Abgleich mit der vorliegenden Informationsqualität vorgestellt. ROHWEDER ET AL.⁵⁷² sowie WANG⁵⁷³ haben den Begriff Informationsqualität (IQ) im wirtschaftlichen Kontext dazu anhand von vier Kategorien und 15 Kriterien strukturiert und beschrieben. Die vier IQ-Kategorien Systemunterstützt, Inhärent, Darstellungsbezogen und Zweckabhängig beziehen sich dabei auf die vier Untersuchungsgegenstände System, Inhalt, Darstellung und Nutzung. In Abbildung 105 sind die vier Kategorien sowie die 15 Kriterien dargestellt. In Tabelle 2 sind die verschiedenen Kriterien der vier Kategorien inklusive einer Definition abgebildet.



Abbildung 105: IQ-Dimensionen in vier IQ-Kategorien⁵⁷⁴

⁵⁶⁹ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 3714 - Blatt 2), 2022, S. 3-4.
⁵⁷⁰ VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 3714 - Blatt 2), 2022.
⁵⁷¹ Graberg (Operationalisierung von digitalen Schatten im Werkzeugbau), 2022.
⁵⁷² Vgl. Rohweder et al. (Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe), 2021.
⁵⁷³ Vgl. Wang et al. (Toward quality data: An attribute-based approach), 1995.
⁵⁷⁴ Vgl. Rohweder et al. (Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe), 2021, S. 28.

Kategorie	Kriterium	Definition
Inhärent	Hohes Ansehen	Informationen sind hoch angesehen, wenn die Informationsquelle, das Transportmedium und das verarbeitende System im Ruf einer hohen Vertrauenswürdigkeit und Kompetenz stehen
	Fehlerfreiheit	Informationen sind fehlerfrei, wenn sie mit der Realität übereinstimmen
	Objektivität	Informationen sind objektiv, wenn sie streng sachlich und wertfrei sind
	Glaubwürdigkeit	Informationen sind glaubwürdig, wenn Zertifikate einen hohen Qualitätsstandard aufweisen oder die Informationsgewinnung und Informationsverbreitung mit hohem Aufwand betrieben werden
Zweck-abhängig	Aktualität	Informationen sind aktuell, wenn sie die tatsächliche Eigenschaft des beschriebenen Objektes zeitnah abbilden
	Wertschöpfung	Informationen sind wertschöpfend, wenn ihre Nutzung zu einer quantifizierbaren Steigerung einer monetären Zielfunktion führen kann
	Vollständigkeit	Informationen sind vollständig, wenn sie nicht fehlen und zu den festgelegten Zeitpunkten in den jeweiligen Prozess-Schritten zur Verfügung stehen
	Angemessener Umfang	Informationen sind von angemessenem Umfang, wenn die Menge der verfügbaren Informationen den gestellten Anforderungen genügt
	Relevanz	Informationen sind relevant, wenn sie für den Anwendenden notwendige Informationen liefern
Darstellungs-bezogen	Verständlichkeit	Informationen sind verständlich, wenn sie unmittelbar von den Anwendenden verstanden und für deren Zwecke eingesetzt werden können
	Übersichtlichkeit	Informationen sind übersichtlich, wenn genau die benötigten Informationen in einem passenden und leicht fassbaren Format dargestellt sind
	Einheitliche Darstellung	Informationen sind einheitlich dargestellt, wenn die Informationen fortlaufend auf dieselbe Art und Weise abgebildet werden
	Eindeutige Auslegbarkeit	Informationen sind eindeutig auslegbar, wenn sie in gleicher, fachlich korrekter Art und Weise begriffen werden
Systemunter-stützt	Zugänglichkeit	Informationen sind zugänglich, wenn sie anhand einfacher Verfahren und auf direktem Weg für den Anwendenden abrufbar sind
	Bearbeitbarkeit	Informationen sind leicht bearbeitbar, wenn sie leicht zu ändern und für unterschiedliche Zwecke zu verwenden sind

Tabelle 2: Definition der IQ-Kriterien⁵⁷⁵

Für darüber hinausgehende Informationen wird auf ROHWEDER ET AL. verwiesen.⁵⁷⁶ Nach CICHY & RASS⁵⁷⁷ und WANG ET AL.⁵⁷⁸ kann die Beschreibung der Informationsqualität grundsätzlich anhand der Kategorien Nützlichkeit, Verfügbarkeit, Interpretierbarkeit und Verlässlichkeit erfolgen. GRABERG entwickelt diese allgemeingültigen Kriterien für die Anwendung im Werkzeugbau vor dem Hintergrund der Operationalisierung des Digitalen Schattens weiter und gelangt zu dem in Tabelle 3 dargestellten Ergebnis. Die Definition der jeweiligen Skalen sowie

⁵⁷⁵ Vgl. Rohweder et al. (Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe), 2021, S. 26-27.

⁵⁷⁶ Vgl. Rohweder et al. (Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe), 2021, S. 25-29.

⁵⁷⁷ Vgl. Cichy; Rass (An Overview of Data Quality Frameworks), 2019, S. 24636.

⁵⁷⁸ Vgl. Wang et al. (Toward quality data: An attribute-based approach), 1995, S. 350.

die Festlegung sinnvoller Extremwerte der einzelnen Kriterien ist abhängig vom Anwendungsfall und den anwendungsfallbezogenen Vorgaben.⁵⁷⁹

Kategorie	Kriterium	Ausprägung				
 Nützlichkeit	Erforderliche Aktualität	Informationsalter				
	Einheitliche Darstellung	Format			Werteinventar	
 Zugänglichkeit	Vollständige Verfügbarkeit	Zeitliche Verfügbarkeit			Inhaltliche Verfügbarkeit	
	Geforderter Datenschutz	Vertraulichkeit	Verbindlichkeit	Transparenz	Nicht-Verkettbarkeit	Intervenierbarkeit
 Interpretierbarkeit	Eindeutige Auslegung	Standardisiertes Verständnis			Rahmenbedingungen	
	Mögliche Bearbeitbarkeit	Art der Werteverarbeitung				
 Verlässlichkeit	Benötigte Exaktheit	Informationsgenauigkeit				
	Akzeptierte Fehlertoleranz	Fehlertoleranz				

Tabelle 3: Kriterien zur Bewertung der Informationsqualität⁵⁸⁰

Auf die Definition der geforderten Informationsqualität folgt die Untersuchung der vorhandenen Daten in Bezug auf die Erfüllung der definierten Anforderungen. Nach GRABERG eignet sich dazu ein Vorgehen in vier Schritten. Zunächst erfolgt die Identifizierung der verfügbaren Daten inklusive der zugrundeliegenden Systemlandschaft. Im zweiten Schritt werden die identifizierten Daten hinsichtlich der Datenqualitätsanforderungen klassifiziert und auf dieser Basis im dritten Schritt die Eignung der verfügbaren Daten für den Anwendungsfall abgeleitet. Abschließend folgt die Festlegung des zusätzlichen Datenbedarfs. Dabei werden zwei Arten von Daten unterschieden. Zum einen Daten, die benötigt werden, aber nicht verfügbar sind, und zum anderen Daten, die nicht in ausreichender Quantität oder Qualität vorliegen. Das vierschrüttige Vorgehen in Anlehnung an GRABERG ist in der nachfolgenden Abbildung 106 dargestellt.⁵⁸¹



Abbildung 106: Vorgehen zur Untersuchung der vorliegenden Daten⁵⁸²

⁵⁷⁹ Vgl. Graberg (Operationalisierung von digitalen Schatten im Werkzeugbau), 2022, S. 128-134.
⁵⁸⁰ Vgl. Graberg (Operationalisierung von digitalen Schatten im Werkzeugbau), 2022, S. 131.
⁵⁸¹ Vgl. Graberg (Operationalisierung von digitalen Schatten im Werkzeugbau), 2022, S. 159.
⁵⁸² I.A.a. Graberg (Operationalisierung von digitalen Schatten im Werkzeugbau), 2022, S. 159.

Inhaltlich basieren die in diesem Kapitel beschriebenen Inhalte auf mehreren durch den Autor durchgeführten oder begleiteten Konsortial- und Industrieprojekten zu den Themen digitale Erfassung und Auswertung von Werkzeugstandmengen, effiziente Werkzeuginstandhaltung während der Serienproduktion sowie Konzeption und Umsetzung einer digitalen Werkzeugakte. In Zusammenarbeit mit zahlreichen und namhaften Vertretern des Werkzeugbaus, der Serienproduktion sowie der Werkzeuginstandhaltung sind die Herausforderungen einer instanzbasierten Datenerfassung entlang des Werkzeuglebenszyklus vor dem Hintergrund einer hohen Anfälligkeit für fehlerhafte manuelle Eingaben diskutiert, Anforderungen an die Datenqualität abgeleitet und mögliche Konzepte für eine abgesicherte Erfassung von möglichst qualitativ hochwertigen Informationen besprochen worden.

5.2.1.2 Prozessschritte zur Aufnahme der Werkzeugdaten und -kosten

Die Identifikation der einzelnen Prozessschritte zur Aufnahme der Werkzeugdaten und -kosten entlang des Werkzeuglebenszyklus dient dazu, den Ist-Prozess der Datenerhebung aufzunehmen. Darauf aufbauend erfolgt im zweiten Schritt die Klassifikation der Datenerhebung, die Identifikation möglicher Fehlerquellen bei der Datenerfassung sowie die Ableitung von Anforderungen an den Soll-Prozess. Im Gegensatz zum Vorgehen nach GRABERG wird zunächst der Status-quo aufgenommen, da so zunächst ein Verständnis bei allen Beteiligten für die vorliegende IT- und Software-Infrastruktur geschaffen wird. Darauf aufbauend kann der Soll-Prozess inklusive möglicher Anpassungen an der Hardware und Software mit Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten mit einem praktikablen Nutzen-Aufwand-Verhältnis umgesetzt werden. Im Folgenden wird ein Vorgehen zur Identifikation der einzelnen Prozessschritte zur Aufnahme der Werkzeugdaten und -kosten entlang des Werkzeuglebenszyklus vorgestellt. Für die als notwendig deklarierten Werkzeugkosten und -daten erfolgt die Prozessaufnahme mittels eines Flowcharts, in dem die Prozessstruktur, sowie deren Schnittstellen mit der IT-Infrastruktur anschaulich dargestellt werden. Dazu können die Flowchart-Modellierungselemente der ISO 5807:1985 genutzt werden. In Abbildung 107 sind die sieben für diese Arbeit verwendeten Flowchart-Modellierungselemente der ISO 5807:1985 sowie ein eigenständig ergänztes dargestellt⁵⁸³. Für die Darstellung wird ein Element ergänzt, da die ISO 5807:1985 kein entsprechendes Element vorsieht.

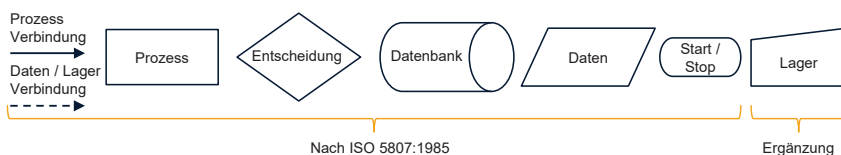


Abbildung 107: Flowchart Modellierungselemente⁵⁸⁴

Für ein besseres Verständnis wird nachfolgend ein Beispiel erläutert. In Abbildung 108 ist dazu der Lagerablage- und Entnahmeprozess eines Werkzeugs dargestellt. Im Detail werden die

⁵⁸³ Vgl. International Organization for Standardization (ISO 5807:1985), 1985, S. 2-19.

⁵⁸⁴ Eigene Darstellung

zu übergebenden Daten, in diesem Fall die Materialnummer, die Stückzahl sowie Stückkosten, und das führende System, in dem Fall das ERP-System, dargestellt.

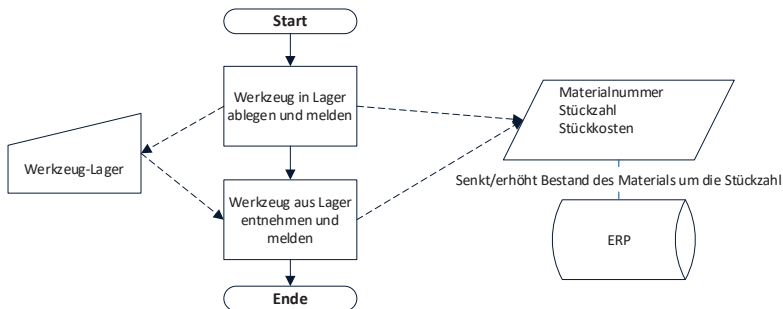


Abbildung 108: Flowchart Beispiel - Werkzeuglager⁵⁸⁵

Die Erstellung des Flowcharts erfolgt in Interviews mit den Experten für das jeweilige Themengebiet. Es kann zwischen Prozessexperten und Softwareexperten unterschieden werden, wobei beide Parteien vertreten sein sollten. Die Prozessexperten sind z.B. Produktionsmitarbeiter, die den Prozessablauf und die genauen Gründe für die Meldung eines frühzeitigen Werkzeugverschleißes kennen. Softwareexperten sind z.B. Werks-IT-Mitarbeiter, die wissen, welche Daten wie aus dem ERP-System extrahiert werden können. Oft sind Teile der zu erfassenden Prozesse bereits in Form von Flowcharts oder anderen Dokumenten in den Abteilungen vorhanden. Diese können genutzt werden, es sollte jedoch vorher im Interview sichergestellt werden, dass sie aktuell sind und alle relevanten Prozessvarianten beinhalten. Die Erfassung des Ist-Prozesses kann in verschiedenen Etappen mit unterschiedlichen Fokuspunkten erfolgen. In der ersten Iteration des Prozesses kann sich z.B. auf die Nutzung des Werkzeugs konzentriert werden, in der nächsten Iteration auf die Bereitstellung. Es besteht die Zielsetzung, dass nach Abschluss der Prozessaufnahme der komplette Werkzeuglebenszyklus bzw. der zuvor definierte Teil des Werkzeuglebenszyklus mit seinen IT-Infrastruktur-Schnittstellen im Ist-Zustand erfasst ist.

5.2.1.3 Identifikation möglicher Fehlerquellen sowie Anforderungsableitung

Auf Basis der erfassten Prozesslandkarte erfolgt im zweiten Schritt die Klassifizierung der einzelnen Datenpunkte des Datenerhebungsprozesses in den Kategorien Nützlichkeit, Zugänglichkeit, Interpretierbarkeit und Verlässlichkeit in Anlehnung an GRABERG⁵⁸⁶, RIESENER ET AL.⁵⁸⁷ sowie SCHUH ET AL.⁵⁸⁸. Mit Hilfe der Klassifizierung können mögliche Schwachpunkte oder Fehlerquellen im Datenerhebungsprozess identifiziert werden. Die Klassifizierung erfolgt in der Kategorie Nützlichkeit anhand der Kriterien Aktualität und Darstellung. Dazu werden das In-

⁵⁸⁵ Eigene Darstellung

⁵⁸⁶ Vgl. Graberg (Operationalisierung von digitalen Schatten im Werkzeugbau), 2022, S. 131-142.

⁵⁸⁷ Vgl. Riesener et al. (Framework for defining information quality based on data attributes within the digital shadow using LDA), 2019, S. 309.

⁵⁸⁸ Vgl. Schuh et al. (Data quality program management for digital shadows of products), 2019, S. 46.

formationsalter sowie die Standardisierung und das Vorhandensein eines definierten Wertevorrats kategorisiert. In der zweiten Kategorie Zugänglichkeit wird anhand der Kriterien Verfügbarkeit und Datenschutz die zeitliche und inhaltliche Verfügbarkeit sowie die Gewährleistung des Datenschutzes bewertet. In der dritten Kategorie Interpretierbarkeit wird anhand der Kriterien Auslegung, Bearbeitbarkeit, Fokus und Detaillierungsgrad das Vorhandensein eines einheitlichen Datenverständnisses sowie definierter Rahmenbedingungen, die Art der Weiterbearbeitung, der Betrachtungsfokus sowie der Detaillierungsgrad klassifiziert. Abschließend wird in der letzten Kategorie Verlässlichkeit anhand der Kriterien Exaktheit, Fehlertoleranz, Art der Erfassung und Art der Kontrolle die Fehlertoleranz, der Grad der Informationsgenauigkeit und der Grad der Fehlertoleranz sowie die Art der Erfassung und die Art der Kontrolle eingeordnet. Abhängig von der gewählten Zielsetzung sowie dem vorliegenden Werkzeugtyp können die Kriterien sowie die Antwortmöglichkeiten variieren. In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die Kriterien für die Klassifizierung der einzelnen Datenpunkte des Datenerhebungsprozesses dargestellt.

Kategorie	Kriterium	Ausprägung	
Nützlichkeit	Aktualität	Informationsalter [sec/min/d]	
	Darstellung	Standardisiertes Format [ja/nein]	Definierter Wertevorrat [ja/nein]
Zugänglichkeit	Verfügbarkeit	Zeitlich [Angabe in %]	Inhaltlich [Angabe in %]
	Datenschutz	Gewährleistung des Datenschutzes [ja/nein]	
Interpretierbarkeit	Auslegung	Standardisiertes Verständnis [ja/nein]	Definierte Rahmenbedingungen [ja/nein]
	Bearbeitbarkeit	Art der Weiterbearbeitung [manuell/teilautomatisiert/automatisiert]	
	Fokus	Betrachtungsfokus [Komplett Werkzeug/Baugruppe/Werkzeugkomponente]	
	Detaillierungsgrad	Detaillierungsgrad [Typebene/Instanzebene]	
Verlässlichkeit	Exaktheit	Informationsgenauigkeit [gering/mittel/hoch]	
	Fehlertoleranz	Fehlertoleranz [gering/mittel/hoch]	
	Art der Erfassung	Art der Erfassung [manuell eingegeben/manuell ausgewählt/automatisiert/multimodal]	
	Art der Kontrolle	Art der Kontrolle [Keine/manuell/automatisiert]	

Tabelle 4: Klassifizierung der Datenpunkte des Datenerhebungsprozesses⁵⁸⁹

Aufbauend auf der Klassifizierung erfolgt die Identifikation möglicher Fehlerquellen bei der Datenerfassung innerhalb der einzelnen Prozessschritte. Dazu eignet sich die Durchführung einer prozessbezogenen Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse (FMEA), die nachfolgend

⁵⁸⁹ Eigene Darstellung

kurz erläutert wird. Nach TIETJEN ET AL. dient die FMEA dazu, bei einem beliebigen Prozess alle potenziellen Ausfallarten und deren Ursachen und Auswirkungen zu identifizieren und zu analysieren. In DIN EN ISO 12100⁵⁹⁰ wird die grundsätzliche Terminologie und Methodologie im Detail beschrieben. Die Ziele, Anwendungsmöglichkeiten und Randbedingungen für den Einsatz der FMEA sind in der nachfolgenden Abbildung 109 dargestellt.⁵⁹¹



Abbildung 109: Ziele, Anwendungsmöglichkeiten und Randbedingungen für eine FMEA⁵⁹²

Die Prozess-FMEA erfolgt aufbauend auf dem zuvor erstellten Flowchart. Der aufgenommene Prozess wird dazu gemeinsam im Experten-Team auf mögliche Ausfälle hin untersucht und für jeden Ausfall ursächliche Fehler abgeleitet. Anschließend werden für jeden Fehler mögliche Folgen und infrage kommende Ursachen ermittelt. Anschließend werden die Fehler hinsichtlich der Fehlerkosten bewertet.⁵⁹³ Für die Ermittlung realistischer Fehlerkosten ist es empfehlenswert, bereits abgeschlossene Projekte hinsichtlich der jeweils relevanten Fehlerkosten zu analysieren. In der nachfolgenden Abbildung 110 ist ein entsprechendes Beispiel für die Werkzeugnutzungsphase dargestellt. Aufgrund eines Werkzeugbruchs kommt es während der Serienproduktion zu einem werkzeugbedingten Maschinenstillstand. Der Anlagenbediener ist angehalten, einen aussagekräftigen Fehlergrund anzugeben, um die spätere Ursachenanalyse zu vereinfachen. Für den Fall, dass jedoch kein Fehlergrund angegeben wird, kann die Ursache nicht ausgewertet und der Fehler nicht abgestellt werden. Eine mögliche Ursache kann sein, dass die Angabe des Fehlergrunds kein Pflichtfeld ist. Der Fehler wird aufgrund der ho-

⁵⁹⁰ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN ISO 12100), 2011-03.

⁵⁹¹ Vgl. Tietjen; Decker (FMEA-Praxis), 2020, S. 19-21.

⁵⁹² Vgl. Tietjen; Decker (FMEA-Praxis), 2020, S. 21.

⁵⁹³ Vgl. Tietjen; Decker (FMEA-Praxis), 2020, S. 124-127.

hen möglichen Fehlerfolgekosten, die durch einen werkzeugbedingten Maschinenstill entstehen können, mit fünf von fünf Punkten bewertet. Der Wahl einer fünfschrittigen Skala für die Bewertung der Fehlerkosten ist beispielhaft.

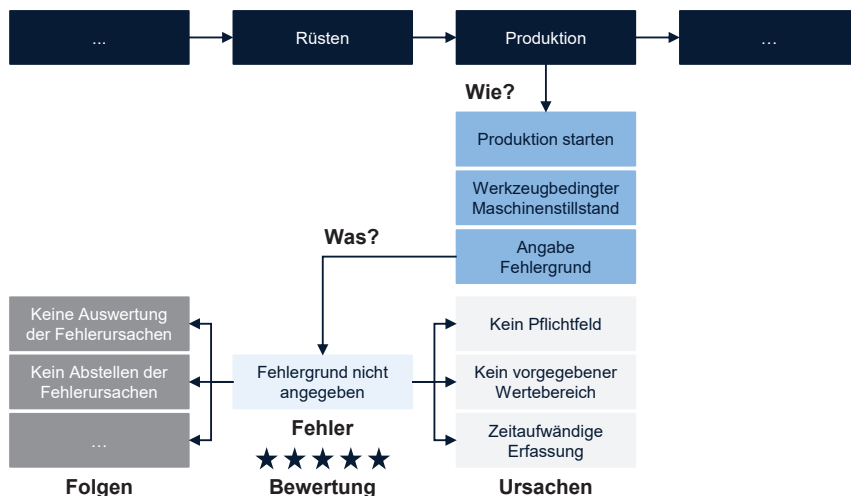


Abbildung 110: Beispiel für Prozess-FMEA für das Fokuselement Werkzeugnutzung⁵⁹⁴

In Analogie zum vorgestellten Beispiel sollten alle zuvor erfassten Fehler sowie die dazugehörigen Folgen und Ursachen analysiert und bewertet werden. Auf Basis der erarbeiteten Klassifikation sowie der identifizierten und bewerteten möglichen Fehlerquellen bei der Datenerfassung erfolgt die Ableitung von Anforderungen an den zukünftigen Prozess zur Aufnahme der Werkzeugdaten und -kosten. Dazu wird gemeinsam im Expertenteam die Nützlichkeit der einzelnen Datenpunkte für die zuvor definierte Zielsetzung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse bewertet und anschließend eine Soll-Klassifizierung der einzelnen Datenpunkte des Datenerhebungsprozesses durchgeführt.

Das Vorgehen wird anhand des zuvor eingeführten Beispiels erläutert. Bei der Angabe des Grundes für einen werkzeugbedingten Maschinenstillstand während der Serienproduktion besteht die Möglichkeit, dass kein Fehlergrund angegeben wird. Dadurch wird die spätere Ursachenanalyse erschwert oder sogar verhindert, was teure Folgekosten für nicht verhinderte werkzeugbedingte Maschinenstillstände sowie mögliche Konventionalstrafen für nicht rechtzeitig gelieferte Produkte nach sich ziehen kann. Als mögliche Ursachen für das Auftreten des Fehlers wird genannt, dass die Angabe des Fehlergrunds kein Pflichtfeld ist, dass kein vorgegebener Wertebereich in Form eines Auswahl-Menüs vorhanden ist und die Erfassung zeitaufwändig für den Anlagenbedienenden ist. Der Fehler wird aufgrund der hohen möglichen Fehlerkosten mit fünf von fünf Punkten bewertet. Die Nützlichkeit des Datenerhebungspunktes

⁵⁹⁴ Eigene Darstellung

Grund für einen Werkzeugbedingten Maschinenstillstand für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse wird durch das Expertenteam als sehr hoch bewertet, da die Kenntnis des Grunds des werkzeugbedingten Maschinenstillstands eine notwendige Voraussetzung ist, um systematisch für unterschiedliche Gründe die jeweils dahinterliegende Ursache zu ermitteln und nachhaltig abzustellen.

Auf Basis der bewerteten Nützlichkeit erfolgt abschließend die Soll-Klassifikation des Datenerhebungspunkts Grund für einen werkzeugbedingten Maschinenstillstand. Dazu werden die für den gewählten Datenerhebungspunkt relevanten Kriterien im Sollzustand definiert. Für den Datenerhebungspunkt Grund für einen werkzeugbedingten Maschinenstillstand ist beispielsweise ein standardisiertes Format der Abfrage sowie ein definierter Wertevorrat in Form eines Auswahl-Menüs mit zuvor definierten Stillstandsgründen notwendig. Darüber hinaus ist es notwendig, die Informationen auf Instanzebene für einzelne Werkzeugkomponenten oder Werkzeugbaugruppen zu erfassen und mithilfe einer automatisierten Kontrolle z. B. in Form einer Pflichteingabe sicherzustellen, sodass bei jedem werkzeugbedingten Maschinenstillstand ein Fehlergrund ausgewählt wird. Die vollständige Soll-Klassifizierung für den Datenerhebungspunkt Grund für einen werkzeugbedingten Maschinenstillstand ist in der nachfolgenden Tabelle 5 dargestellt. In Analogie zum dargestellten Beispiel erfolgt die Erfassung der Anforderungen für den zukünftigen Datenerhebungsprozess für alle notwendigen Datenerhebungspunkte.

Datenerhebungspunkt: Grund für einen werkzeugbedingten Maschinenstillstand			
Kategorie	Kriterium	Ausprägung	
Nützlichkeit	Aktualität	Informationsalter 5 Minuten	
	Darstellung	Standardisiertes Format ja	Definierter Wertevorrat ja
Interpretierbarkeit	Auslegung	Standardisiertes Verständnis ja	Definierte Rahmenbedingungen ja
	Fokus	Betrachtungsfokus Baugruppe/Werkzeugkomponente	
	Detaillierungsgrad	Detaillierungsgrad Instanzebene	
Verlässlichkeit	Exaktheit	Informationsgenauigkeit hoch	
	Fehlertoleranz	Fehlertoleranz gering	
	Art der Erfassung	Art der Erfassung manuell ausgewählt	
	Art der Kontrolle	Art der Kontrolle automatisiert	

Tabelle 5: Soll-Klassifizierung Datenerhebungspunkt Grund Maschinenstillstand⁵⁹⁵

⁵⁹⁵ Eigene Darstellung

Auf die Vorstellung der unterschiedlichen Systematiken zur Beschreibung der Informationsqualität nach ROHWEDER ET AL.⁵⁹⁶, GRABERG⁵⁹⁷, RIESENER ET AL.⁵⁹⁸ sowie SCHUH ET AL.⁵⁹⁹ sowie der Vorgehensbeschreibung zur Ist- und Soll-Klassifikation der Datenerhebungspunkte folgt die Vorstellung der Voraussetzungen für ein erfolgreiches Datenanalyse-Projekt nach VDI-Norm 3714 Blatt 1⁶⁰⁰ sowie der wichtigsten Rahmenbedingungen der Branche Werkzeugbau mit der Zielsetzung, übergeordnete Anforderungen für den Datenerhebungsprozess abzuleiten. Die wichtigsten Voraussetzungen sind in der nachfolgenden Abbildung 111 dargestellt.⁶⁰¹ In Abbildung 112 folgt die Auflistung der wichtigsten Rahmenbedingungen der Branche Werkzeugbau in Bezug auf die Datenerfassung.⁶⁰²

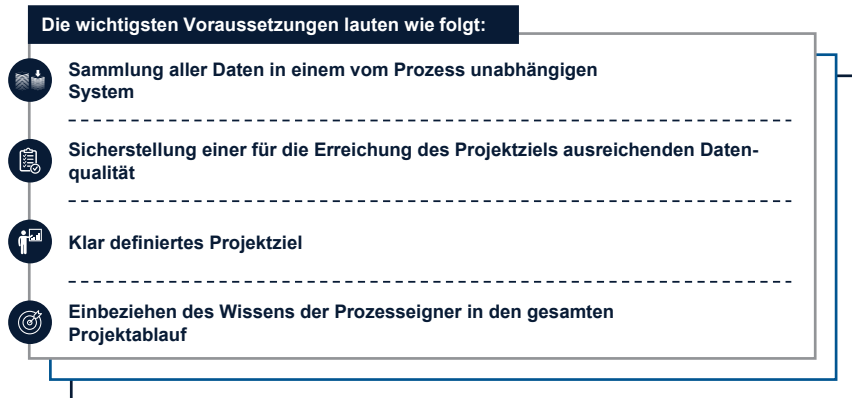


Abbildung 111: Voraussetzungen für ein erfolgreiches Datenanalyse-Projekt⁶⁰³

⁵⁹⁶ Rohweder et al. (Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe), 2021, S. 23-27.

⁵⁹⁷ Graberg (Operationalisierung von digitalen Schatten im Werkzeugbau), 2022, S. 131-142.

⁵⁹⁸ Riesener et al. (Framework for defining information quality based on data attributes within the digital shadow using LDA), 2019, S. 309.

⁵⁹⁹ Schuh et al. (Data quality program management for digital shadows of products), 2019, S. 46.

⁶⁰⁰ VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 3714 - Blatt 1), 2022.

⁶⁰¹ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 3714 - Blatt 1), 2022, S. 13-14.

⁶⁰² Vgl. Boos et al. (IT-Infrastruktur zur digitalen Vernetzung im Werkzeugbau), 2021, S. 9-17.

⁶⁰³ Eigene Darstellung

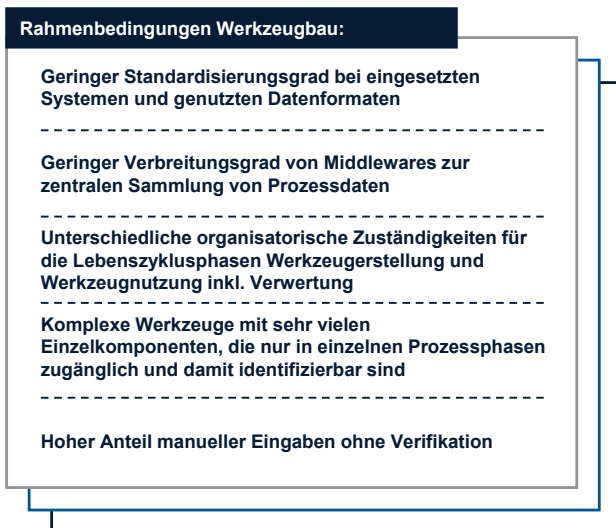


Abbildung 112: Rahmenbedingungen in der Branche Werkzeugbau⁶⁰⁴

Basierend auf den genannten Voraussetzungen für ein erfolgreiches Datenanalyse-Projekt sowie den Rahmenbedingungen der Branche Werkzeuge werden nachfolgend vier übergeordnete Anforderungen an den Datenerhebungsprozess erläutert. Die erste Anforderung ist die eindeutige Werkzeugidentifizierung. Abhängig vom gewählten Betrachtungsfokus ist es notwendig, dass jedes Werkzeug bzw. jede Werkzeugbaugruppe bzw. jede einzelne Werkzeugkomponente über den gesamten Lebenszyklus eindeutig identifizierbar ist und diesem jederzeit spezifische Informationen zugeordnet werden können. Für die spezifische Identifizierung und Zuordnung von Informationen eignet sich beispielsweise eine eindeutige ID. Die Zuordnung von Informationen zu einzelnen Werkzeugkomponenten oder Baugruppen sollte darüber hinaus auch dann gewährleistet sein, wenn das Werkzeug zusammengebaut ist. Falls die Zuordnung der Informationen zum Werkzeug nicht physisch durch Scannen der jeweiligen ID möglich ist, sollte die Information dem Digitalen Zwilling des Werkzeugs zugeordnet werden können. Informationen, die nicht direkt der Werkzeug-ID zugeordnet werden können, sollten einer anderen eindeutigen ID, z. B. der Auftragsnummer des Serienproduktionsauftrags, zugeordnet werden können.

Die zweite Anforderung ist die Sicherstellung einer hohen Informationsqualität bei manuellen Eingaben. Der hohe Anteil manueller Eingaben ohne Verifikation stellt eine potenzielle Fehlerquelle dar. Insbesondere während der Werkzeugbereitstellungs- und -nutzungsphase ist der Anteil an Prozesswissen, über das nur der Mitarbeitende verfügt, sehr hoch. Die Anforderung besteht darin, das Prozesswissen des Mitarbeitenden möglichst vollständig und fehlerfrei ins

⁶⁰⁴ Eigene Darstellung

System zu externalisieren. Dazu zählen insbesondere die Rahmenbedingungen, das Hintergrundwissen und die Gründe beim Auftreten eines Fehlers oder einer ungeplanten Prozessunterbrechung.

Die dritte Anforderung ist die Umsetzung eines zentralen Speicherorts, Single Point of Truth, an dem alle Informationen prozessunabhängig gesammelt werden können, um parallel zum laufenden Prozess die Daten aufbereiten und analysieren zu können.

Die vierte und abschließende Anforderung besteht im Schutz der Daten entlang der Prozesskette. Dabei wird zwischen internem und externem Datenschutz differenziert. Zum einen müssen die vertraulichen Daten zwischen den unterschiedlichen organisatorischen Abteilungen oder Unternehmen entlang des Werkzeuglebenszyklus geschützt werden und zum anderen müssen innerhalb eines Unternehmens oder einer Organisationseinheit rollenspezifisch Zugriffsrechte vergeben werden. In der nachfolgenden Abbildung 113 sind die vier Anforderungen zusammengefasst dargestellt.

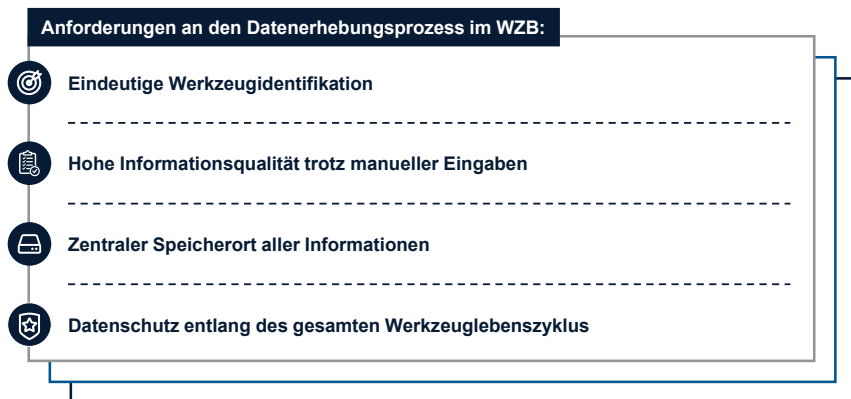


Abbildung 113: Anforderungen an den Datenerhebungsprozess im Werkzeugbau⁶⁰⁵

Für die ersten drei Anforderungen wird im nächsten Unterkapitel im Rahmen der Ableitung eines anforderungsgerechten Erfassungskonzepts eine mögliche Lösung konzeptioniert. Die vierte Anforderung Schutz der Daten entlang der Prozesskette wird später während der Ausgestaltung des Verhaltenselements übergreifendes Wissensmanagement thematisiert.

5.2.1.4 Ableitung eines anforderungsgerechten Erfassungskonzeptes

Wie zu Beginn des Aktivitätselements Instanzbasierte Datenerfassung erläutert, ist die erfolgreiche Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse maßgeblich abhängig von der erfassten Informationsqualität. Zum Beispiel ist es für eine aussagekräftige bauteilspezifische Datenanalyse notwendig, zu jedem Zeitpunkt t_i die genaue Zusammenstellung einer Baugruppe bzw. eines Werkzeugs zu kennen. Es wird folglich für jeden Zeitpunkt t_i

⁶⁰⁵ Eigene Darstellung

eine digitale Abbildung des Zusammenbaus des Werkzeugs bzw. der Baugruppe benötigt. Da der Aufwand der Datenvorbereitung bis zu 70 % des Gesamtaufwands eines Projekts betragen kann, ist ein Erfolgsfaktor die Sicherstellung einer guten Datenqualität bereits während der Erfassung, um den Aufwand für die nachfolgende Datenbereinigung möglichst gering zu halten.⁶⁰⁶

Auf Basis der zuvor vorgestellten Schritte zur Erarbeitung eines Erfassungskonzepts sowie der drei hergeleiteten übergeordneten Anforderungen wird nachfolgend die Entwicklung eines instanzbasierten Erfassungskonzepts zur Sicherstellung eines stabilen Erfassungsprozesses entlang des Werkzeuglebenszyklus vorgestellt. Im ersten Schritt werden dazu alle Anforderungen, sowohl die Soll-Klassifizierung jedes Datenerhebungspunktes sowie die übergeordneten Anforderungen als auch weitere unternehmensspezifische Rahmenbedingungen und Anforderungen in ein Lastenheft für die Auswahl einer Software für die Datenerfassung sowie die Datenspeicherung überführt. Abhängig von den unternehmensspezifischen Randbedingungen sollte die Softwareauswahl für die Datenerfassung separat für die Phasen der Werkzeugbereitstellung, -nutzung und -ausmusterung betrachtet werden. In vielen Fällen existieren bereits Systeme für die Datenerfassung, die jeweils angepasst und genutzt werden können. Dazu werden die definierten Anforderungen an die zu erfassenden Daten sowie die Datenerhebungsmethode mit dem vorliegenden Ist-Zustand abgeglichen und die Differenz zwischen Ist- und Soll-Zustand herausgestellt.

Anschließend wird gemeinsam im interdisziplinären Team ermittelt, wie hoch der Aufwand für die Erreichung des definierten Soll-Zustands ist und ob das Aufwand-Nutzen-Verhältnis mit der zuvor definierten Zielsetzung für die Werkzeuglebenszykluskostenanalyse in Einklang steht. Insbesondere während der Werkzeugbereitstellungsphase sind die Informationen, die im ERP- sowie PPS-System des Werkzeugbaus gesammelt werden, ein guter Ausgangspunkt für die Datensammlung. Während der Werkzeugnutzungsphase besteht die Herausforderung darin, dass das Werkzeug an sich nicht mehr im Fokus steht, sondern lediglich ein Fertigungshilfsmittel für einen Fertigungsauftrag darstellt. Insbesondere die Auflösung auf einzelne Werkzeuginstanzen wird im Standard von vielen MES-Systemen noch nicht unterstützt. Die Grundvoraussetzung für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse ist, dass die spezifische Werkzeugkomponenten-ID mit der Auftragsnummer des Fertigungsauftrags während der Serienproduktion im MES-System verknüpft wird. Diese Verknüpfung ist essentiell, da wie in Anforderung eins bereits angedeutet fast alle Informationen entweder der Werkzeug-ID oder der Fertigungsauftragsnummer (FA-Nummer) zugeordnet werden können.

Sobald diese Verknüpfung erstellt worden ist, können auch spätere weitere Informationen mit sehr wenig Aufwand zusätzlich erfasst werden. Als Beispiel dient hier die Rohmaterialcharge des Endprodukts. Auf dem Fertigungsauftrag wird in den meisten Fällen die Charge des Rohmaterials vermerkt. Durch die Verknüpfung von Werkzeug-ID und FA-Nummer kann bei der Analyse der Werkzeugstandmenge mit sehr wenig Aufwand die jeweilige Rohmaterialcharge

⁶⁰⁶ Vgl. Rollins (Foundational Methodology for Data Science), 2015, S. 1-6.

und damit der Einfluss auf die Standmenge mitbetrachtet werden. Ohne die initiale Verknüpfung während der Serienproduktion wird die spätere Ursachenanalyse z. B. für Standmengenabweichungen sehr erschwert. In der nachfolgenden Abbildung 114 ist die Verknüpfung dargestellt.

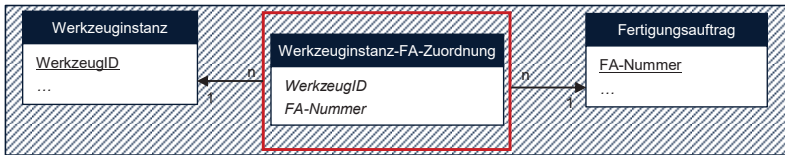


Abbildung 114: Verknüpfung Werkzeug-ID und FA-Nummer⁶⁰⁷

Für die Verknüpfung von Werkzeug-ID und FA-Nummer ist es eine Voraussetzung, dass jede Werkzeugkomponente mit einer ID ausgestattet ist. Für einen einfachen und sichereren Erfassungsprozess bietet sich die Kennzeichnung jeder Komponente mit einem DMC-Code an. Der DMC-Code kann bereits im Werkzeugbau als letzter Arbeitsschritt aufgetragen werden. Die Herausforderung besteht darin, dass diese ID und die Zuordnung von ID zur Werkzeuginstanz aus dem Werkzeugbau in die Stammdaten des Fertigungshilfsmittels überführt werden müssen. Eine mögliche Lösung besteht darin, dass die Werkzeug-ID bereits bei Bestellauslösung durch die Serienproduktion erstellt und dem Werkzeugbau mitgeteilt wird. Bei Lieferung der hergestellten und gekennzeichneten Werkzeugkomponente wird der DMC-Code eingescannt und das Fertigungsmittel als im Lager vorhanden gekennzeichnet.

Zum Start des Fertigungsauftrags ist es im zweiten Schritt notwendig, die IDs der eingesetzten Werkzeugkomponenten zu scannen, um damit die Verknüpfung zwischen Werkzeug-ID und FA-Nummer herzustellen. Da ein Werkzeug in den meisten Fällen aus sehr vielen einzelnen Werkzeugkomponenten besteht, wäre das Abscannen aller einzelnen Komponenten bei Start des Fertigungsauftrags zum einen aus Zeitgründen nicht möglich und zum anderen sind viele Komponenten im eingebauten Zustand nicht zugänglich und können entsprechend nicht eingescannt werden. Daher empfiehlt es sich zunächst im Team zu bestimmen, für welche Komponenten eines Werkzeugs die Erfassung und Verknüpfung mit der FA-Nummer vorgesehen werden sollte.

Als Kriterium bietet sich hier das mögliche Einsparpotenzial ein, welches mithilfe einer datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse realisiert werden kann. Es sollten folglich vor allem Aktivteile, also Werkzeugkomponenten, die aktiv im Eingriff mit dem herzustellenden Produkt sind und zudem erhöhtem Verschleiß unterworfen sind, für die Erfassung ausgewählt werden. Die Auswahl sollte stets in Übereinstimmung mit der zuvor definierten Zielsetzung erfolgen. Für eine einfache systemseitige Unterscheidung von Werkzeugkomponenten, die erfasst und die nicht erfasst werden sollen, gibt es die Möglichkeit, eine entsprechende Kennzeichnung in den Stammdaten des Fertigungshilfsmittels vorzunehmen. Damit ist sichergestellt, dass die MES-Software auftragspezifisch über eine Auflistung der zu scannenden

⁶⁰⁷ Eigene Darstellung

Werkzeugtypen verfügt, die zum automatischen Abgleich der bereits gescannten und noch zu scannenden Werkzeugkomponenten genutzt werden kann.

Im zweiten Schritt sollte im Team definiert werden, wie systemseitig das digitale Abbild des Werkzeugs im zusammengebauten Zustand abgebildet werden kann. Eine Möglichkeit besteht darin, dass jedes Werkzeug eine übergeordnete ID sowie weitere IDs für einzelne Baugruppen erhält. Beim Zusammenbau werden die einzelnen Werkzeugkomponenten mit der jeweiligen Baugruppe bzw. dem übergeordneten Werkzeug verknüpft. Der Digitale Schatten sowie der Digitale Zwilling jeder Werkzeugkomponente sowie des übergeordneten Werkzeugs stellen sicher, dass im System dokumentiert ist, aus welchen Werkzeugkomponenten sich das übergeordnete Werkzeug zum Zeitpunkt t_i zusammensetzt. Sollte eine Baugruppe oder Werkzeugkomponente für die Herstellung von unterschiedlichen Produktvarianten in mehreren übergeordneten Werkzeugsätzen verwendet werden, kann mithilfe des Digitalen Schattens und des Digitalen Zwillings die Einsatzhistorie nachverfolgt werden. Für die Verknüpfung und Weiterverarbeitung der gesammelten Informationen ist ein zentraler Speicherort notwendig. An diesem Ort können die Informationen parallel zum laufenden Prozess aufbereitet und visualisiert werden.

Nachfolgend wird auf den Softwareauswahlprozess für die Aufbereitung und Visualisierung der Informationen eingegangen. Die Aufbereitung der Daten wird im nachfolgenden Kapitel 5.2.2 erläutert. Die Auswahl des zu nutzenden Anwendungsprogramms für das Dashboard, auch Business Intelligence-Tool (BI-Tool) genannt, sollte in Zusammenarbeit mit der IT-Abteilung erfolgen. Im Folgenden werden verschiedene BI-Tools erläutert. Danach wird ein Vorgehen zur Bewertung verschiedener BI-Tools vorgestellt.

Standardnutzerprogramme zur Datenauswertung wie Tabellenprogramme sind für die Erstellung von Dashboards nicht geeignet, da die Visualisierungsmöglichkeiten eingeschränkt, die Echtzeit-Einbindung verschiedener Datenquellen schwierig und die Performance bei großen Datenmengen niedrig sind. Die meisten BI-Tools lassen sich einer der folgenden Gruppen zuordnen:

- BI-Tools als Cross-Selling-Produkte von Unternehmensanwendungssoftware, z. B. SAP Analytics Cloud, Salesforce Einstein Analytics
- Eigenständige BI-Tools, z. B. SAS BI, Tableau, Power BI
- Process-Mining-Tools, z. B. Celonis, myInvenio

Viele dieser Softwareanwendungen laufen teilweise oder vollständig als Web-Apps. Durch den Wegfall einer Desktop-Applikation kann die Nutzerfreundlichkeit erhöht werden. Falls keine oder mehrere dieser Applikationen im Unternehmen zum Einsatz kommen gilt es, die für den Anwendungsfall passendste Option auszuwählen. Die Bewertung der Tools kann beispielhaft anhand der Kriterien vorhandene Infrastrukturanbindung, Lizenzkosten, Bedienerfreundlichkeit und Advanced-Analytics-Features erfolgen. Ferner kann, falls nur ein Tool im Unternehmen in Anwendung ist, dieses im Vergleich zu anderen Tools bewertet und bei Bedarf ein Umstieg vorgeschlagen werden. Die Ausprägungen der Bewertungskriterien der Tools können in einem Netzdiagramm festgehalten werden. Über die Gewichtung der Kriterien muss je nach

Anwendungsfall entschieden werden. Beispielsweise muss das Kriterium Bedienerfreundlichkeit bei Nutzung des Dashboards von BI-vorerfahrenen Personen nicht stark gewichtet werden, da BI-vorerfahrene Personen sich mit wenig Aufwand in das BI-Tool einarbeiten können. In der nachfolgenden Abbildung 115 ist ein beispielhaftes Netzdiagramm für den Vergleich von BI-Tools dargestellt.

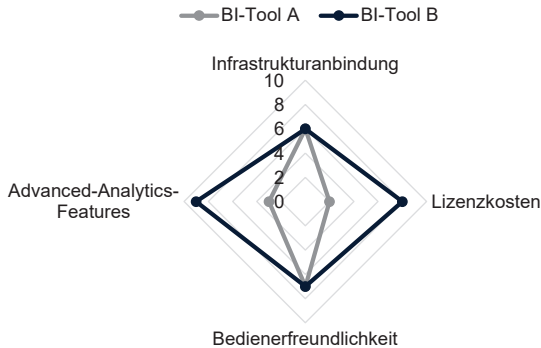


Abbildung 115: Netzdiagramm zum Vergleich von BI-Tools⁶⁰⁸

Sobald das Erfassungskonzept abgeleitet und für die verschiedenen Anwendungsfälle und Lebenszyklusphasen ausgewählt worden ist, erfolgt die stufenweise Einführung und Erprobung des entwickelten Konzepts. Die Entwicklung sollte dabei iterativ erfolgen. Ein Erfolgskriterium ist die Qualität der erfassten Informationen. Um die Qualität systematisch und nachvollziehbar bewerten zu können, empfiehlt es sich, eine Datenampel zur Visualisierung des Qualitätsgrads aller oder vor allem der durch die Mitarbeitenden erfassten Daten zu integrieren.

Für die Werkzeugnutzungsphase werden nachfolgend verschiedene Möglichkeiten vorgestellt. Wie bereits zuvor erläutert, kann es für die Werkzeuglebenszykluskostenanalyse von Bedeutung sein, Transparenz über werkzeugbedingte Maschinenstillstände zu erlangen, die Ursachen zu identifizieren und abzustellen. Dafür ist es notwendig, den Grund für den werkzeugbedingten Maschinenstillstand zu kennen. In den meisten Fällen ist dazu eine manuelle Eingabe durch den Mitarbeitenden z. B. im MES-System notwendig. Das Vorliegen und die Qualität der Eingabe entscheiden maßgeblich über den Mehrwert der anschließenden Analyse. Um zu überprüfen, ob beim Eintreten eines werkzeugbedingten Maschinenstillstands ein Grund angegeben worden ist, gibt es zunächst die Möglichkeit, die Summe an Statusänderungen eines Werkzeugs von gebraucht zu defekt mit der Summe der angegebenen Stillstandsgründe zu vergleichen. Wenn die Summen gleich sind, ist die Datenampel für dieses Kriterium grün, bei geringen Abweichungen gelb und bei großen Abweichungen rot. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, zu überprüfen, ob bei einem Werkzeugwechsel während der Serienproduktion ein Grund für den Wechsel angegeben worden ist. Abhängig vom Anteil der Fälle, in denen

⁶⁰⁸ Eigene Darstellung

trotz Werkzeugwechsel kein Grund angegeben worden ist, zeigt die Datenampel entsprechend rot, gelb oder grün.

Es gibt viele weitere Möglichkeiten, die Informationsqualität der eingegebenen Informationen zu bewerten, auf die an dieser Stelle jedoch nicht weiter eingegangen werden soll. Grundsätzlich ist es wichtig, dass die Datenampel in Zusammenarbeit mit den Eingebenden erarbeitet wird und es Regeltermine gibt, an denen die Informationsqualität gemeinsam besprochen wird und gegebenenfalls Maßnahmen zur Verbesserung der Informationsqualität abgeleitet werden. Der Aufwand der Datenvorbereitung kann bis zu 70 % des Gesamtaufwands eines Projekts betragen. Die Sicherstellung einer guten Datenqualität bereits während der Erfassung ist ein Erfolgsfaktor, um den Aufwand für die nachfolgende Datenbereinigung möglichst gering zu halten.⁶⁰⁹ In der nachfolgenden Abbildung 116 ist beispielhaft eine Datenampel zur Visualisierung der Informationsqualität dargestellt. Die systematische Entwicklung eines anforderungsgerechten Ansatzes zur teilautomatisierten Erfassung der Werkzeugkosten und -daten ist damit abgeschlossen. Im Rahmen des folgenden Aktivitätselementes wird die bauteilspezifische Datenanalyse vorgestellt.

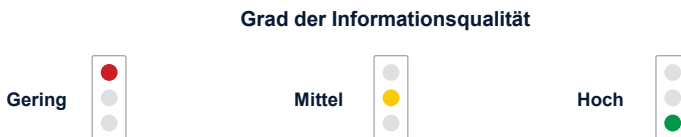


Abbildung 116: Datenampel zur Visualisierung der Informationsqualität⁶¹⁰

5.2.2 Bauteilspezifische Datenanalyse

Zur Realisierung der zuvor definierten Ziele der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse ist es notwendig, auf Basis der erfassten Daten die zugrundeliegenden Ursache-Wirkungszusammenhänge zu identifizieren. Die Analyse und Auswertung der Zusammenhänge erfolgt mithilfe der bauteilspezifischen Datenanalyse. Auf Basis der Ergebnisse können anschließend mittelbare und unmittelbare Maßnahmen für eine kurz- bzw. langfristige Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten abgeleitet werden. Das Aktivitätselement wird aus zwei Gründen unter dem Begriff bauteilspezifische Datenanalyse zusammengefasst.

Es soll herausgestellt werden, dass die Werkzeuglebenszykluskosten je werkzeugfallendem Bauteil betrachtet und reduziert werden sollen. Der zweite Grund ist, dass die Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten nicht für alle Komponenten des Werkzeugs, sondern für spezifisch ausgewählte Bauteile des Werkzeugs durchgeführt wird. Folglich ist eine weitere Zielsetzung für die Bauteilspezifische Datenanalyse die systematische Identifizierung der Werkzeugkomponenten mit dem höchsten Kosteneinsparpotenzial je produziertem Endprodukt. Die vielfältigen Einflussfaktoren auf die Werkzeugkosten je produziertem Endprodukt können dazu

⁶⁰⁹ Vgl. Rollins (Foundational Methodology for Data Science), 2015, S. 1-6.

⁶¹⁰ Eigene Darstellung

führen, dass die zur Analyse notwendigen Daten nicht im initial entwickelten Datenmodell enthalten sind und zunächst ergänzt werden müssen. Die dazu notwendige iterative Weiterentwicklung des Datenmodells folgt dem Vorbild der iterativen Produktentwicklung und den damit verbundenen Vorteilen eines effizienten und zielorientierten Entwicklungsvorgehens.

Ein zweiter Aspekt neben der Datenanalyse ist die anforderungsgerechte Visualisierung der analysierten Informationen für die unterschiedlichen Anwendenden. Dazu zählen beispielsweise die Anlagenbedienenden, welche die Ergebnisse direkt in die Serienproduktion zurückführen können, Coaches oder Gruppenführende in der Serienproduktion, die Verantwortung für die Werkzeugkosten für eine Anlage tragen, oder Produktionsingenieure, welche die optimale Produktionsstrategie und den kostenoptimalen Werkzeugeinsatz verfolgen.

Im weiteren Verlauf werden die Gestaltungsaspekte, die für die Entwicklung eines Ansatzes für die bauteilspezifische Datenanalyse und -auswertung notwendig sind, im Detail vorgestellt. Zunächst ist die Identifikation des anwenderabhängigen Informationsbedarfs notwendig. Im zweiten Schritt erfolgt die Ableitung des informationsabhängigen Datenbedarfs sowie die Entwicklung standardisierter Analyseszenarien im Anwendungszusammenhang. Basierend darauf folgt die Entwicklung anforderungsgerechter Kennzahlen sowie die Entwicklung eines anforderungsgerechten Visualisierungskonzepts für die unterschiedlichen Anwendergruppen. Die Gestaltungsaspekte des Gestaltungselements Bauteilspezifische Datenanalyse sind in Abbildung 117 dargestellt.

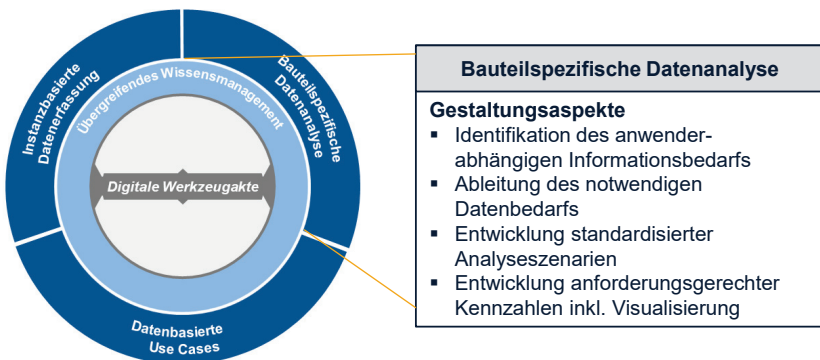


Abbildung 117: Aspekte des Gestaltungselements Bauteilspezifische Datenanalyse⁶¹¹

Inhaltlich basieren die in diesem Kapitel beschriebenen Inhalte auf mehreren durch den Autor durchgeführten oder begleiteten Konsortial- und Industrieprojekten zu den Themen digitale Erfassung und Auswertung von Werkzeugstandmengen, effiziente Werkzeuginstandhaltung während der Serienproduktion sowie Konzeption und Umsetzung einer digitalen Werkzeugakte. In Zusammenarbeit mit zahlreichen und namhaften Vertretern des Werkzeugbaus, der Serienproduktion sowie der Werkzeuginstandhaltung sind die Herausforderungen einer syste-

⁶¹¹ Eigene Darstellung

matischen Datenauswertung und -analyse vor dem Hintergrund der branchenspezifischen Besonderheiten des Werkzeugbaus sowie dem Unikatcharakter der einzelnen Werkzeuge diskutiert, Anforderungen abgeleitet und gemeinsam Konzepte für Analyseszenarien sowie Visualisierungsmöglichkeiten erarbeitet und diskutiert worden.

5.2.2.1 Grundlagen

Methodisch und strukturell orientiert sich dieses Kapitel an dem in Kapitel 2.3.4.3 vorgestellten Cross Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM), das als Standard für die Entwicklung von Data-Science-Projekten gilt.⁶¹² Der Prozess besteht aus den sechs Schritten Betriebsverständnis aufbauen und Zielsetzung festlegen, Datenverständnis erarbeiten, Daten vorbereiten, Daten modellieren, Daten evaluieren und Lösung implementieren.⁶¹³ In Anlehnung an das vorgestellte Vorgehen wird nachfolgend ein Ansatz für die bauteilspezifische Datenanalyse und -auswertung im Anwendungskontext entwickelt und vorgestellt.

5.2.2.2 Identifikation des anwenderabhängigen Informationsbedarfs

Für eine zielgerichtete Bauteilspezifische Datenanalyse ist es notwendig, zunächst den anwenderabhängigen Informationsbedarf zu identifizieren. Aufbauend auf den identifizierten übergeordneten Zielsetzungen der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse liegt der Fokus auf dem Informationsbedarf der einzelnen Anspruchsgruppen. Es können die zwei Phasen Datenerfassung sowie zielgerichtete Analyse der erfassten Daten unterschieden werden. Grundsätzlich werden zunächst die für die Bauteilspezifische Datenanalyse relevanten Stakeholder und anschließend der anwenderabhängige Informationsbedarf identifiziert. Das zweischrittige Vorgehen ist in Abbildung 118 dargestellt.



Abbildung 118: Identifikation des anwenderabhängigen Informationsbedarfs⁶¹⁴

Identifikation der relevanten Anspruchsgruppen

Bei der Identifikation der relevanten Anspruchsgruppen für die Bauteilspezifische Datenanalyse können die zwei Phasen Datenerfassung und Datenanalyse unterschieden werden. In der ersten Phase der Datenerfassung liegt der Fokus insbesondere auf den Personen, die einen großen Einfluss auf die Qualität und den Wert der erfassten Daten oder Informationen primär während der Werkzeugnutzungsphase haben. Neben dem Anlagenbedienenden kommen

⁶¹² Vgl. Martinez-Plumed et al. (CRISP-DM Twenty Years Later), 2020, S. 1.; Vgl. Shearer (The CRISP-DM model), 2000, S. 13.

⁶¹³ Vgl. Shearer (The CRISP-DM model), 2000, S. 14.

⁶¹⁴ Eigene Darstellung

weitere Anspruchsgruppen infrage, dazu zählen beispielsweise Anlageneinrichter, Werkzeug-instandhalter sowie deren Vorgesetzte, die häufig die Verantwortung für die Werkzeugkosten für einen Teilbereich der Produktion tragen.

In der zweiten Phase der Datenanalyse liegt der Fokus auf den Personen, die für die kurz- bzw. langfristige Bauteilspezifische Datenanalyse verantwortlich sind. Unter der kurzfristigen Analyse werden beispielsweise die wöchentliche Auswertung der Toptreiber der Werkzeugkosten sowie die größten Abweichungen der erreichten Standmengen von den zu erwartenden Standmengen verstanden. Häufig sind die Personen nützlich, die die Verantwortung für die Werkzeugkosten für einen Teilbereich der Produktion tragen. Beispielsweise können diese Personen die Rolle des Coaches⁶¹⁵ innehaben. Die Bezeichnung dafür kann von Unternehmen zu Unternehmen variieren. Unter der langfristigen Analyse wird ein Zeitraum von mehr als einem Monat verstanden. Ein typischer Analysezeitraum ist ein oder auch mehrere Geschäftsjahre, um beispielsweise Trends bei den Werkzeugkosten je produziertem Teil, der Werkzeugverfügbarkeit oder bei den erreichten Standmengen zu analysieren. Diese Art der Analyse wird häufig von Produktionsingenieuren oder Personen mit ähnlicher Positionsbezeichnung durchgeführt, deren Aufgabe darin besteht, die Produktion inklusive der eingesetzten Fertigungshilfsmittel, in diesem Fall dem Werkzeug, aus Kosten- und Ressourcensicht zu verbessern. Für die unternehmensindividuelle Identifizierung der genannten Rollen kann auf die bereits identifizierten Anspruchsgruppen sowie die aufgenommen Prozessschritte zur Aufnahme der Werkzeugdaten und -kosten zurückgegriffen werden. Falls die notwendigen Rollen auf diese Weise nicht identifiziert werden können, sollten sie definiert werden. Die identifizierten Anspruchsgruppen sollten abschließend in Verbindung mit der dazugehörigen Phase dokumentiert werden. Nachdem die relevanten Stakeholder ermittelt worden sind, folgt die Identifikation des Informationsbedarfs.

Identifikation des Informationsbedarfs

Die Identifikation des Informationsbedarfs orientiert sich an den zuvor identifizierten Stakeholdern für die zwei Phasen Datenerfassung und Datenanalyse, wobei der Zielkorridor bereits durch die identifizierten übergeordneten Zielsetzungen der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse vorgegeben ist. Für eine systematische Identifikation des Informationsbedarfs im Rahmen der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse sollten möglichst alle bzw. möglichst viele der zuvor identifizierten Stakeholder hinsichtlich ihres Informationsbedarfs befragt werden. Für die Identifikation des Informationsbedarfs wird wieder das Tool der Use Story mit der Grundstruktur „Als <Benutzerrolle> möchte ich <das Ziel>, damit/so dass <Nutzen/Grund für das Ziel>“ verwendet.⁶¹⁶ Die User Stories werden im Austausch mit den einzelnen Stakeholdern soweit detailliert und diskutiert, bis der benötigte Informationsbedarf eindeutig identifiziert ist. In der nachfolgenden Abbildung 119 sind beispielhaft verschiedene User Stories zur Identifikation des Informationsbedarfs für die erste Phase der Datenerfassung dargestellt.

⁶¹⁵ Detaillierte Ausführungen dazu siehe Kapitel 5.1.2

⁶¹⁶ Vgl. Wirdemann (Scrum mit User Stories), 2011, S. 59.

<Benutzerrolle>	<das Ziel>	<Nutzen/Grund>
Anlagenbedienende	Dynamisch die verbleibende Reststandmenge einsehen	Einen werkzeugbedingten Anlagenstillstand vermeiden
Werkzeuginstandhaltende	Bereits durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen und werkzeugspezifische Kommentare einsehen	Aufwandsarme und zielgerichtete Werkzeuginstandhaltung durchführen
Anlageneinrichtende	Werkzeughistorie einsehen	Einstellparameter anforderungsgerecht anpassen

Abbildung 119: Identifikation Informationsbedarf – Phase der Datensammlung⁶¹⁷

Die Identifikation des Informationsbedarfs für die Phase der Datenerfassung und damit die Sicherstellung einer hohen Motivation für die Datenaufnahme bei den jeweiligen Mitarbeitenden ist von sehr großer Bedeutung. Eine hohe Quantität und eine hohe Qualität bei den erfassten Daten sind die Voraussetzungen für eine aussagekräftige Datenanalyse. Dies gilt insbesondere für Daten, die nur durch den Mitarbeitenden an der Anlage im Gesamtkontext erfasst und interpretiert werden können, dazu zählen beispielsweise die Rahmenbedingungen bei einem werkzeugbedingten Produktionsstillstand.

Die zielgerichtete Bereitstellung von Informationen, basierend auf den erfassten Werkzeuglebenszyklusdaten und -kosten, vereinfacht die Arbeit der betreffenden Anspruchsgruppen und steigert damit die Motivation für eine hochwertige und umfassende Datenabgabe. Erhält der Anlagenbedienende beispielsweise Informationen über die voraussichtliche Reststandmenge des in der Anlage eingebauten Werkzeugs, kann er unter Zuhilfenahme der Informationen einen werkzeugbedingten Anlagenstillstand vermeiden. Die ungeplante Mehrarbeit, die durch einen ungeplanten Werkzeugausfall anfallen würde, kann somit verhindert werden. Der betreffende Mitarbeiter erkennt unmittelbar den Mehrwert einer sorgfältigen und vollständigen Dateneingabe, da er unmittelbar davon profitiert.

In der nachfolgenden Abbildung 120 sind beispielhaft verschiedene User Stories zur Identifikation des Informationsbedarfs für die zweite Phase der Datenanalyse dargestellt. Auf die Identifikation des anwenderabhängigen Informationsbedarfs für die zwei Phasen der Datenerfassung und -analyse folgt die Ableitung des notwendigen Datenbedarfs sowie die iterative Weiterentwicklung der Datenstruktur.

⁶¹⁷ Eigene Darstellung

<Benutzerrolle>	<das Ziel>	<Nutzen/Grund>
Coach	Ausreißer bei den Werkzeugkosten je produziertem Teil einsehen	Kurzfristige Maßnahmendefinition zur Kostenreduzierung
Produktionsingenieur	Werkzeugkosten je produziertem Teil für unterschiedliche Produktvarianten miteinander vergleichen	Produktvariantenabhängige Reduzierung der Werkzeugkosten je produziertem Teil
Produktionsingenieur	Werkzeugkosten je produziertem Teil bezogen auf die verwendete Anlage einsehen	Produktionsanlagenabhängige Reduzierung der Werkzeugkosten je produziertem Teil
Produktionsingenieur	Größtes Einsparpotenzial in Bezug auf die Werkzeugkosten einsehen	Systematische und zielgerichtete Reduzierung der Kosten

Abbildung 120: Identifikation Informationsbedarf – Phase der Datenanalyse⁶¹⁸

5.2.2.3 Ableitung Datenbedarf & Iterative Weiterentwicklung der Datenstruktur

In diesem Kapitel wird vorgestellt, wie ausgehend von den Anforderungen der Datenanalyse die zur Verfügung stehenden Daten mithilfe eines morphologischen Kastens bewertet und in zwei Kategorien eingeteilt werden können. Basierend auf der Klassifizierung kann eingeschätzt werden, welche Analysen durchgeführt werden können und in welchem Bereich zusätzliche oder qualitativ hochwertigere Daten erfasst werden sollten, um den zuvor definierten Zielsetzungen gerecht zu werden. Eine solche Klassifizierung erweist sich als essenziell für die spätere, detaillierte Datenanalyse. Die Klassifikationsebenen gliedern sich in die Bestimmung der Art der Daten sowie die Evaluierung ihrer Qualität. Resultierend aus dieser Klassifikation kann die Eignung für diverse Data Analytics-Level abgeleitet werden, die durch den jeweiligen Datensatz realisierbar sind. Diese Klassifikation dient als essenzieller Abgleich mit den Prämissen unterschiedlicher Analysemethoden. Ein solches Vorgehen skizziert die Potenziale und Limitationen der Analyse und gibt Aufschluss darüber, welche Methoden anwendbar sind und welche nicht. In der nachfolgenden Abbildung 121 sind die drei Schritte zur Ableitung des notwendigen Datenbedarfs dargestellt und werden nachfolgend im Detail vorgestellt.

⁶¹⁸ Eigene Darstellung



Abbildung 121: Vorgehen zur Ableitung des notwendigen Datenbedarfs⁶¹⁹

Für die Bestimmung der Art der Daten wird primär erörtert, an welchen Stellen Daten erhoben werden und welche spezifischen Inhalte diese aufweisen. Dazu wird zunächst zwischen Stamm- und Bewegungsdaten differenziert. In der Wirtschaftsinformatik gibt es eine Parallele zwischen diesen Kategorien in den Begrifflichkeiten von Bestands- und Änderungsdaten. Während Bestandsdaten oftmals synonym zu Stammdaten verwendet werden, ähneln Änderungsdaten in ihrer Ausrichtung den Bewegungsdaten. Ein wesentlicher Fokus liegt auf dem Wechselspiel zwischen diesen Daten, da Änderungsdaten potenzielle Auswirkungen auf Stammdaten haben können.⁶²⁰ Im spezifischen Kontext des Werkzeugbaus kann die Kategorie der Bewegungsdaten weiter verfeinert werden. Hierbei wird zwischen Werkzeug-Auftragsdaten, die Kunden-, Lieferanten-, Werkzeug- und Produktdaten umfassen, und Betriebsdaten unterschieden. Nach GRABERG umfassen Betriebsdaten bauteil-, lagerbestands-, prozess-, arbeitsplatz-, fertigungshilfsmittel-, personal- und qualitätsbezogene Informationen.⁶²¹ Ein zentrales Merkmal, das diese Datenkategorien voneinander differenziert, sind die Methoden ihrer Erhebung. Daten im Werkzeugbau werden entweder systembasiert, Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) basiert oder sensorbasiert erfasst. Während die systembasierte Methode typische ERP- und PPS-Systeme im Werkzeugbau nutzt und gelegentlich MES-Systeme hinzuzieht, fokussiert sich die IKT-basierte Methode auf Technologien zur Speicherung, Verarbeitung und Vernetzung von Daten. Sensorbasierte Daten hingegen erfassen kontinuierliche Parameter mittels Sensoren.⁶²² Für die geplante Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten ist es notwendig, die Daten entsprechend der genannten Datenkategorien und zugehörigen Erhebungsmethoden zu kategorisieren. Zwei Hauptausprägungen dieser Datenkategorien können unterschieden werden.

Daten der Kategorie 1 enthalten system- oder IKT-basierte Daten und beinhalten Informationen zu Fertigungsaufträgen, Werkzeugen, Produkten und Anlagen. Dies umfasst detaillierte Daten wie Sollstandmengen, Ist-Standmengen, Werkzeuglebenszykluskosten, Ausfallgründe, Ausschuss, Stillstandzeiten, Anlagenstundensätze und weitere spezifische Parameter. Die

⁶¹⁹ Eigene Darstellung

⁶²⁰ Vgl. Schuh; Schmidt (Produktionsmanagement), 2014, S. 44.

⁶²¹ Vgl. Graberg (Operationalisierung von digitalen Schatten im Werkzeugbau), 2022, S. 152.; Vgl. Westkämper (Einführung in die Organisation der Produktion), 2006, S. 179-181.

⁶²² Vgl. Graberg (Operationalisierung von digitalen Schatten im Werkzeugbau), 2022, S. 168-169.

Daten der Kategorie 2 sind sensorbasiert und umfassen Prozessdaten, welche technische Parameter wie Temperatur, Kraft und Beschleunigung erfassen. Diese Daten können weiterhin in die vier Dimensionen Produktionsanlage, Werkzeug, Material und Endprodukt eingeteilt werden. Ein zweiter, zentraler Aspekt in diesem Kontext ist die Qualität der Daten.

Die Datenqualität beeinflusst maßgeblich die Geschwindigkeit der Modelle, die auf Basis des Datensatzes erstellt werden. Um optimale Analysen und Prognosen zu gewährleisten, ist es von zentraler Bedeutung, die Datenqualität zu evaluieren und in die Überlegungen einzubeziehen.⁶²³ Die Norm ISO/IEC 25024 liefert hierzu verschiedene Bewertungskategorien der Datenqualität.⁶²⁴ Diese lassen sich weiter in inhärente und systemabhängige Datenqualität untergliedern. Im Kontext dieser Arbeit liegt der Fokus hauptsächlich auf der inhärenten Datenqualität, insbesondere auf den Kriterien der Genauigkeit, Vollständigkeit, Konsistenz, Vertrauenswürdigkeit und Aktualität.⁶²⁵ Die Genauigkeit, die Konsistenz und die Glaubwürdigkeit der Daten müssen bereits bei der Datenaufnahme sichergestellt werden. Für die Klassifizierung der Daten liegt der Fokus in diesem Teil der Arbeit auf den Kategorien Vollständigkeit und Datenaktualität, wobei auch diese Kategorien bereits erwähnt und hier wieder aufgegriffen und weiter vertieft werden. Die Datenqualität steht in Relation zur Größe des Datensatzes. Eine mögliche Vorgehensweise zur Optimierung ist die Reduzierung von Null-Werten oder die Expansion des Datensatzes, um die Performance eines darauf basierenden Modells zu steigern. Abschließend ist die Datenverfügbarkeit wie in der besagten Norm aufgeführt insbesondere durch die Trennung von Werkzeugbau und Serienproduktion von zentraler Bedeutung.⁶²⁶ Im Rahmen der Evaluierung der Datenqualität bildet die Vollständigkeit der Daten die erste zu bewertende Dimension. Fehlende Daten sind ein charakteristisches und wiederkehrendes Problem im Rahmen der Datenanalyse.⁶²⁷ Hierbei hat insbesondere der Effekt von Null-Werten auf die Performance von Modellen eine entscheidende Bedeutung. Es hat sich gezeigt, dass das Fehlen von Daten die statistische Aussagekraft eines Modells deutlich verringert. Prognostizierte Werte, die auf unvollständigen Datensätzen basieren, können zu Fehlern führen, die letztendlich in fehlgeleiteten Entscheidungen resultieren.⁶²⁸ Beispielsweise kann bereits ein Anteil von 5 % Null-Werten dazu führen, dass die Ungenauigkeit eines Modells um 20 Prozentpunkte ansteigt. Bei einem Anteil von 10 % Null-Werten kann die Ungenauigkeit bereits bis zu 40 % betragen und bei 20 % Null-Werten sogar bis zu 60 %. Diese Werte basieren auf der Analyse eines umfangreichen Datensatzes von ungefähr 7.000 Datenpunkten und unter Verwendung eines ID3 Classifiers, einem Entscheidungsbaum-Algorithmus.⁶²⁹ Künstliche neuronale Netze und Support Vector Machines zeigen eine höhere Robustheit gegenüber fehlenden Daten. Dennoch lieferten auch diese Modelle ab einem Schwellenwert von 30 % feh-

⁶²³ Vgl. Jain et al. (Overview and Importance of Data Quality for Machine Learning Tasks), 2020, S. 3561.

⁶²⁴ Vgl. ISO/IEC, (ISO/IEC 25024), 2015-10, S. 12-31.

⁶²⁵ Vgl. Gualo et al. (Data quality certification using ISO/IEC 25012: Industrial experiences), 2021, S. 2.

⁶²⁶ Vgl. ISO/IEC, (ISO/IEC 25024), 2015-10, S. 21.

⁶²⁷ Vgl. Marcelino et al. (Missing Data Analysis in Regression), 2022, S. 2159.; Vgl. Jadhav et al. (Comparison of Performance of Data Imputation Methods for Numeric Dataset), 2019, S. 913.

⁶²⁸ Vgl. Kang (The prevention and handling of the missing data), 2013, S. 402.; Vgl. Graham (Missing data analysis: making it work in the real world), 2009, S. 573.

⁶²⁹ Vgl. Woodall et al. (An Investigation of How Data Quality is Affected by Dataset Size in the Context of Big Data Analytics), 2014, S. 7.

lenden Daten nicht mehr zuverlässige Ergebnisse und waren somit für Analysen oder Entscheidungshilfen unbrauchbar.⁶³⁰ Es ist wichtig zu betonen, dass die Auswirkungen von fehlenden Daten stark vom verwendeten Modell abhängig sind. Zur Bewältigung von Null-Werten existieren verschiedene Strategien. Ein einfacher, jedoch oft nicht optimaler Ansatz, besteht darin, Einträge mit fehlenden Daten komplett zu löschen. Eine komplexere Methode ist das Ersetzen von Null-Werten durch den Durchschnitt oder Median der vorhandenen Datenpunkte der jeweiligen Kategorie. Die komplexeste, aber auch genaueste Methode ist die modellbasierte Imputation von Datenpunkten. Hierbei werden fehlende Datenpunkte basierend auf den bereits vorhandenen Daten vorhergesagt. Dies kann mithilfe verschiedener Machine-Learning-Algorithmen wie der linearen oder logistischen Regression oder auch neuronalen Netzen realisiert werden.⁶³¹ Für eine systematische Bewertung der Vollständigkeit von Daten können auf Grundlage der oben diskutierten Auswirkungen von Null-Werten folgende Kategorien definiert werden.⁶³²

- **Sehr hohe Vollständigkeit:** Weniger als 1 % der Datenpunkte fehlen. Hier ist der Datensatz nahezu perfekt und erfordert nur einen minimalen Reinigungsaufwand.
- **Hohe Vollständigkeit:** 1 % bis 5 % der Datenpunkte fehlen. Es ist ein gewisser Reinigungsaufwand notwendig, jedoch sind die Daten weitgehend vollständig.
- **Mittlere Vollständigkeit:** 5 % bis 15 % der Datenpunkte fehlen. Hier wird ein signifikanter Aufwand zur Datenaufbereitung erforderlich sein.
- **Niedrige Vollständigkeit:** 15 % bis 30 % der Datenpunkte fehlen. Es besteht ein hohes Risiko der Datenunzulänglichkeit und es könnte notwendig sein, weitere Daten zu sammeln.
- **Sehr niedrige Vollständigkeit:** Über 30 % der Datenpunkte fehlen. In solchen Fällen ist der Datensatz für viele Analysen unbrauchbar. Es wird dringend empfohlen, den Ansatz der Datensammlung zu überdenken oder nach alternativen Datenquellen Ausschau zu halten.

Zusätzlich zu der Vollständigkeit der Daten stellt die Aktualität der Daten eine weitere Dimension der Datenqualität dar. Die Aktualität der Daten definiert sich dadurch, inwiefern die vorhandenen Daten zeitlich relevant und somit für den jeweiligen Anwendungsfall ausreichend aktuell sind.⁶³³ Das primäre Ziel hierbei ist es, den gegenwärtigen Wert dieser Daten zu ermitteln. Dies gewährleistet, dass jegliche Prognosen und resultierende Entscheidungen auf einer soliden und zeitgemäßen Basis erfolgen.⁶³⁴ Im Kontext des Werkzeugbaus ist die Datenaktualität von besonderer Relevanz, da die Datenquantität aufgrund des Unikatcharakters der

⁶³⁰ Vgl. Gill et al. (Effect of missing data on performance of learning algorithms for hydrologic predictions: Implications to an imputation technique), 2007, S. 5-9.

⁶³¹ Vgl. Salgado et al. (Secondary Analysis of Electronic Health Records), 2016, S. 147-151.

⁶³² Vgl. Marcelino et al. (Missing Data Analysis in Regression), 2022, S. 2159.; Vgl. Jadhav et al. (Comparison of Performance of Data Imputation Methods for Numeric Dataset), 2019, S. 913.; Vgl. Salgado et al. (Secondary Analysis of Electronic Health Records), 2016, S. 147-151.; Vgl. Woodall et al. (An Investigation of How Data Quality is Affected by Dataset Size in the Context of Big Data Analytics), 2014, S. 7.; Vgl. Kang (The prevention and handling of the missing data), 2013, S. 402.; Vgl. Graham (Missing data analysis: making it work in the real world), 2009, S. 573.; Vgl. Gill et al. (Effect of missing data on performance of learning algorithms for hydrologic predictions: Implications to an imputation technique), 2007, S. 5-9.

⁶³³ Vgl. Hassenstein; Vanella (Data Quality—Concepts and Problems), 2022, S. 503.

⁶³⁴ Vgl. Block (Datenqualität – Lebenselixier der Digitalisierung), 2023, S. 323.

Werkzeuge deutlich geringer ist als in der Serienproduktion. Eine hohe Datenaktualität ist notwendige, um identifizieren zu können, welche der auf Basis der Daten identifizierten Probleme nach wie vor bestehen. Ein kritischer Faktor in der Bestimmung der Datenaktualität ist die Frequenz, mit der Datenupdates vorgenommen werden. Entsprechend der ISO/IEC 25024 erfolgt die Quantifizierung der Datenaktualität durch die Relation der Anzahl der Datenpunkte, die im vorgegebenen Intervall aktualisiert werden, zur Gesamtanzahl der Datenpunkte.⁶³⁵ Bezugnehmend auf die Normierung wird, sofern mehr als 80 % der Daten innerhalb eines definierten Updateintervalls liegen, die jeweilige Ausprägung der Datenaktualität zugewiesen. Im Bereich des Werkzeugbaus werden unterschiedliche Datenkategorien erfasst. Während bestimmte Daten wie beispielsweise Prozessparameter idealerweise in Echtzeit erfasst werden sollten, haben Stammdaten tendenziell größere Aktualisierungsintervalle. Vor diesem Hintergrund werden folgende Ausprägungen für die Datenaktualität definiert:

- **Echtzeitdaten:** Daten, die von intelligenten Werkzeugen nahezu unmittelbar aktualisiert werden. Solche Daten sind insbesondere für Anwendungen von Relevanz, die eine umgehende Reaktion erfordern wie etwa bei der prädiktiven Wartung, um potenzielle Werkzeugausfälle frühzeitig zu erkennen.
- **Aktuell:** Hierbei handelt es sich um Daten, die in täglichen oder stündlichen Intervallen aktualisiert werden, einschließlich spezifischer Werkzeug- und Produktionsdaten.
- **Mäßig aktuell:** Daten dieser Kategorie werden in wöchentlichen, monatlichen oder gar jährlichen Intervallen aktualisiert. Hierunter fallen Informationen wie der Gesamtverbrauch von Werkzeugen, Wartungsereignisse oder Produktionsleistungen. Solche Daten sind insbesondere für mittel- bis langfristige Planungsmodelle oder Trendanalysen relevant.
- **Nicht aktuell:** Hierbei handelt es sich um historische Daten zu Werkzeugen, die nicht mehr in regelmäßigen Abständen aktualisiert werden. Obwohl sie für retrospektive Analysen von Bedeutung sein können, sind sie im Allgemeinen nicht für Vorhersagen oder als Entscheidungshilfen geeignet.

Die Größe eines Datensatzes spielt für die Performance zukünftiger Modelle ebenfalls eine Rolle. Die Vergrößerung des Datensatzes kann als Alternative zur Verbesserung der Vollständigkeit der Daten verwendet werden. Es ist zwar richtig, dass mit einer wachsenden Datenmenge auch potenzielle Fehler in diesem Datensatz ansteigen können, jedoch ist die Tendenz zu beobachten, dass sich der relative Anteil dieser Fehler verkleinert. Dies führt oftmals dazu, dass sich die Performance eines Modells mit steigender Datenanzahl verbessert.⁶³⁶ Es bestehen zahlreiche Daumenregeln und theoretische Modelle, um die angemessene Größe eines Datensatzes zu bestimmen. Eine gängige Regel besagt beispielsweise, dass die Anzahl der Datenpunkte mindestens 10- bis 100-mal größer sein sollte als die Anzahl der Features innerhalb des Datensatzes.⁶³⁷

⁶³⁵ Vgl. ISO/IEC, (ISO/IEC 25024), 2015-10, S. 20.

⁶³⁶ Vgl. Woodall et al. (An Investigation of How Data Quality is Affected by Dataset Size in the Context of Big Data Analytics), 2014, S. 4-8.

⁶³⁷ Vgl. Alwosheel et al. (Is your dataset big enough? Sample size requirements when using artificial neural networks for discrete choice analysis), 2018, S. 168.; Vgl. Jain; Chandrasekaran (39 Dimensionality and sample size considerations in pattern recognition practice), 1982, S. 835-855.

Eine Kategorisierung nach LAWSON ET AL. teilt die Datenmenge in drei spezifische Zonen auf. In der ersten Zone weist die Datenmenge nicht die notwendige Tiefe auf, um einen signifikanten Mehrwert zu erzeugen. Modelle, die auf Basis dieser begrenzten Datenmengen entwickelt werden, neigen dazu, nicht die gewünschten Ergebnisse oder Vorhersagegenauigkeiten zu liefern. Die zweite Zone kennzeichnet einen deutlichen Anstieg im Mehrwert der Daten. Mit jeder zusätzlichen Datenmenge, die in dieser Zone hinzugefügt wird, steigt die Vorhersagegenauigkeit von Modellen, die darauf trainiert werden, signifikant an. Das bedeutet, dass in dieser Phase eine Erhöhung der Datenmenge direkt zu einer verbesserten Modellleistung führt. Schließlich definiert die dritte Zone einen Bereich, in dem die Daten bereits einen hohen Mehrwert besitzen. Während in dieser Zone weiterhin Daten hinzugefügt werden können, tritt das Phänomen des abnehmenden Grenznutzens auf. Das bedeutet, dass trotz zusätzlicher Datenzugaben der Nutzen oder die Effektivität des Modells nicht mehr in demselben Maße ansteigt, wie es in der zweiten Zone der Fall war.⁶³⁸

Es ist jedoch zu beachten, dass die erforderliche Größe eines Datensatzes immer kontextabhängig ist und sowohl vom konkreten Anwendungsfall als auch von der Wahl des eingesetzten Modells beeinflusst wird. Somit lässt sich im Rahmen der Klassifikation des Datensatzes keine klare Trennung vornehmen und die Größe des Datensatzes nicht in die Bewertungskriterien innerhalb des morphologischen Kastens aufnehmen. Falls ein Modell nicht die erwartete Präzision erreicht, kann die Größe des zugrundeliegenden Datensatzes eine mögliche Ursache sein und sollte bei der Datenerhebung und -verarbeitung berücksichtigt werden.

Die beschriebene Trennung zwischen Werkzeugbau und Serienproduktion bedingt, dass der Informationsaustausch im Rahmen der Klassifizierung des Datensatzes noch in verschiedene Ausprägungen unterteilt werden muss. Eine enge Zusammenarbeit beider ist eine essenzielle Voraussetzung, da die Werkzeugbaubetriebe über Werkzeuginformationen verfügen, die Prozessinformationen jedoch nur den Serienproduzenten vorliegen.⁶³⁹

- **Kein Informationsaustausch:** Zwischen Werkzeugbau und Serienproduktion findet keinerlei Informationsaustausch statt.
- **Partieller Informationsaustausch:** Zwischen Werkzeugbau und Serienproduktion findet in gewissen Teilen ein Informationsaustausch statt, jedoch werden nicht alle relevanten Informationen geteilt.
- **Vollständiger Informationsaustausch:** Zwischen Werkzeugbau und Serienproduktion werden alle relevanten Informationen bezüglich der Werkzeuglebenszyklusdaten ausgetauscht.

Klassifizierung der Daten

Im dritten Schritt können die Daten in den zwei vorgestellten Kategorien anhand eines morphologischen Kastens bewertet werden. Das Ergebnis ist eine systematische Klassifikation des Datensatzes. Auf dieser Basis können im weiteren Verlauf fundierte Entscheidungen darüber getroffen werden, welche Analysen auf Grundlage des vorhandenen Datensatzes bereits

⁶³⁸ Vgl. Strongin et al. (A SURVIVOR'S GUIDE TO DISRUPTION), 2019, S. 46.

⁶³⁹ Vgl. Schuh et al. (Predictive Maintenance), 2020, S. 6-7.

durchgeführt werden können und in welchem Bereich gegebenenfalls noch Datenbedarf besteht. Dazu zeigen die unterschiedlichen Ausprägungen der Bewertungskategorien deutlich auf, in welchen Bereichen Optimierungspotenzial vorhanden ist. Es ist dabei essenziell zu betonen, dass die Klassifizierung des Datensatzes nicht strikt festlegt, welche spezifischen Analysemethoden zum Einsatz kommen sollten. Vielmehr dient sie als Orientierungshilfe, um aufzuzeigen, welche Möglichkeiten und Erkenntnisse potenziell aus dem vorliegenden Datensatz herausgearbeitet werden können. In der nachfolgenden Abbildung 122 ist ein morphologischer Kasten zur Klassifizierung der Daten sowie zur Ableitung des notwendigen zusätzlichen Datenbedarfs dargestellt. Der gegebenenfalls zusätzlich benötigte Datenbedarf sollte gemeinsam im Projektteam besprochen und in die initial entwickelte Datenstruktur der Digitalen Werkzeugakte, die im vorherigen Kapitel erläutert wird, integriert werden. Für die Umsetzung einer anforderungsgerechten Datenerfassung wird auf die Ausführung in Kapitel 5.2.1 verwiesen.

Art der Daten		Kategorie 1 (System- oder IKT-basierte Daten)			Kategorie 2 (Sensorbasierte Daten)	
		Sehr hohe Vollständigkeit	Hohe Vollständigkeit	Mittlere Vollständigkeit	Niedrige Vollständigkeit	Sehr niedrige Vollständigkeit
Datenqualität	Vollständigkeit	Echtzeitdaten		Aktuelle Daten	Mäßig aktuelle Daten	Nicht aktuelle Daten
	Datenaktualität	Kein Informationsaustausch		Partieller Informationsaustausch	Vollständiger Informationsaustausch	
	Datenaustausch					

Abbildung 122: Morphologischer Kasten zur Klassifizierung des Datensatzes⁶⁴⁰

5.2.2.4 Entwicklung standardisierter Analyseszenarien

Aufbauend auf der zuvor vorgestellten Klassifikation des Datensatzes werden im Folgenden die zwei standardisierten Analyseszenarien Grobanalyse und Feinanalyse entwickelt und vorgestellt.

Die Grobanalyse repräsentiert den initialen Schritt der Datenanalyse. Sie dient primär dazu, ein besseres Verständnis der Zusammenhänge innerhalb des Datensatzes zu erlangen und die Hauptkostentreiber im Anwendungszusammenhang zu identifizieren. Die tiefergehende Analyse von Ursache-Wirkungsbeziehungen ist nicht Teil der Grobanalyse. Für das Szenario Grobanalyse wird ausschließlich auf Daten aus Kategorie 1 zurückgegriffen. Auch Anwen-

⁶⁴⁰ Eigene Darstellung

Szenario der Grobanalyse anwenden können, um damit erste Erkenntnisse aus ihrem Datensatz ermitteln zu können.

Die Feinanalyse baut auf der Grobanalyse auf und verfolgt einen vertiefenden Ansatz. Das primäre Ziel dieser Analysestufe liegt darin, über die rein deskriptiven und visuellen Darstellungen der Grobanalyse hinauszugehen, um ein detailliertes Verständnis über die tieferliegenden Ursache-Wirkungszusammenhänge zu entwickeln. Darüber hinaus sollen durch den Einsatz von verschiedenen Modellen prädiktive Einschätzungen wie beispielsweise die voraussichtliche Standmenge von Werkzeugen getroffen werden können. Nachfolgend werden die beiden Szenarien Grobanalyse und Feinanalyse detailliert vorgestellt. In der nachfolgenden Abbildung 123 sind sie in ihrer Ausführungsreihenfolge dargestellt.



Abbildung 123: Übersicht und Reihenfolge der zwei standardisierten Analyseszenarien⁶⁴¹

Szenario Grobanalyse

Für das Szenario der Grobanalyse werden drei verschiedene Aspekte im Detail beleuchtet. Zunächst wird das methodische Fundament, die Clusteranalyse, vorgestellt. Anschließend werden die drei Ebenen Anlagen-, Werkzeug- und Produktebene vorgestellt, auf die die Clusteranalyse angewendet wird. Abschließend werden die Anforderungen an den Datensatz abgeleitet, die für die Durchführung der Grobanalyse notwendig sind. Die drei genannten Aspekte sind in der nachfolgenden Abbildung 124 dargestellt und werden im Anschluss detailliert vorgestellt.



Abbildung 124: Drei Hauptaspekte der Grobanalyse⁶⁴²

⁶⁴¹ Eigene Darstellung

⁶⁴² Eigene Darstellung

Grobanalyse – Methodisches Fundament

Das methodische Fundament der Grobanalyse ist die Clusteranalyse. Das Ziel der Clusteranalyse besteht in der Identifikation von Ähnlichkeitsstrukturen in einem Datenbestand. Dazu werden ähnliche Objekte innerhalb einer Datenmenge gruppiert. Die identifizierten Gruppen von ähnlichen Objekten werden als Cluster bezeichnet. Dabei sind die Cluster selbst so homogen wie möglich und gegenüber anderen Clustern so unterschiedlich wie möglich.⁶⁴³ Das Ziel der Clusterbildung im Anwendungszusammenhang besteht darin, Auffälligkeiten oder Anomalien innerhalb der Daten zu identifizieren, die zu hohen Werkzeugkosten führen. Zu Beginn der Clusteranalyse wird eine Korrelationsanalyse mit der Zielsetzung durchgeführt, die Art und Stärke der Beziehungen zwischen den einzelnen Variablen in den Daten zu erkennen und ein grundsätzliches Verständnis für diese Beziehungen aufzubauen⁶⁴⁴. Die Cluster können anschließend auf zwei Arten identifiziert werden. Zum einen können Cluster durch explorative Datenanalyse, in diesem Fall die Definition und Visualisierung verschiedener Kennzahlen, oder durch die Anwendung von Machine Learning respektive Clusteralgorithmen identifiziert werden. Beide Möglichkeiten werden nachfolgend erläutert.

Das Ziel der Explorativen Datenanalyse ist es, ein besseres Verständnis der Daten zu erlangen. Dabei wird zwischen graphischen und nicht graphischen Methoden unterschieden. Typische graphische Visualisierungstechniken sind Histogramme, Boxplots oder Scatterplots. Die Identifizierung von Clustern mittels Visualisierung im Anwendungskontext untergliedert sich in drei aufeinanderfolgende Schritte. Der erste Schritt befasst sich mit der Auswahl der zu visualisierenden Variablen. Hierbei wird nicht nur auf eine reine Datenperspektive gesetzt, sondern auch auf Branchenexpertise. Abhängig vom verwendeten Visualisierungstool können zwischen ein bis drei verschiedene Features abgebildet werden. Der zweite Schritt konzentriert sich auf die Bestimmung der passenden Visualisierungstechnik. Ziel ist es, das adäquate Instrument zu identifizieren, um die zuvor ausgewählten Variablen optimal darzustellen. Der Fokus liegt hierbei insbesondere darauf, potenzielle Cluster, Anomalien sowie Ausreißer in den Daten sichtbar zu machen. Der dritte Schritt widmet sich schließlich der Identifikation und Definition der in den Daten visualisierten Cluster. Hierbei steht die Auswertung der zuvor erstellten Visualisierungen im Vordergrund. Die im Werkzeugbau vorhandene Expertise wird hier genutzt, um die Cluster nicht nur zu identifizieren, sondern auch, um neue, bisher unbekannte Zusammenhänge zwischen den Daten zu definieren und zu interpretieren.

Die algorithmische Clusteranalyse hingegen gliedert sich in vier zentrale Phasen. Zunächst wird im ersten Schritt die Feature-Auswahl vorgenommen. Hierbei ist es essenziell, die Merkmale oder Features herauszufiltern, die für die Identifizierung der Cluster innerhalb des Datensatzes von größter Relevanz sind. Eine allzu umfassende Einbeziehung sämtlicher Features könnte dazu führen, dass Datenrauschen die Ergebnisse negativ beeinflusst und somit die Performance des Clustering-Algorithmus beeinträchtigt wird. Methoden wie die Forward und Backward Selection sind hierbei nützlich. Diese fügen schrittweise Features hinzu oder lassen diese weg, berechnen den Einfluss jeder Änderung auf die Modellperformance und erlauben

⁶⁴³ Vgl. Cornuéjols et al. (Collaborative clustering: Why, when, what and how), 2018, S. 81-82.

⁶⁴⁴ Vgl. Senthilnathan (Usefulness of Correlation Analysis), 2019, S. 5.

so, die optimale Auswahl an Features zu treffen. Der zweite Schritt, die Dimensionsreduktion, dient der Reduzierung der vielfältigen Datenmerkmale auf eine übersichtlichere Dimension, diese ist insbesondere für graphische Darstellungen vorteilhaft. Eine weit verbreitete Technik in diesem Kontext ist die Hauptkomponentenanalyse (PCA). Bei diesem Verfahren werden die ursprünglichen Datenmerkmale in neue, unkorrelierte und unabhängige Hauptkomponenten umgewandelt. Ziel der PCA ist es, möglichst viel von der im Datensatz enthaltenen Varianz über diese neuen Hauptkomponenten abzubilden. Im dritten Schritt steht die Wahl des Algorithmus im Vordergrund. Es gibt verschiedene Verfahren, um Clustering zu realisieren, wobei der k-Means-Algorithmus zu den am häufigsten eingesetzten Ansätzen zählt. Dieser fällt in die Kategorie der partitionierenden Clustering-Verfahren und teilt den Datensatz in eine im Vorfeld festgelegte Anzahl von Clustern. Abschließend erfolgt im vierten Schritt die Evaluation der Ergebnisse. Eine Herausforderung bei der Bewertung der Cluster liegt darin, dass es keine festen Metriken gibt, da die genaue Clusterzusammensetzung im Vorfeld nicht bekannt ist.⁶⁴⁵ Im Anwendungszusammenhang bietet es sich an, die identifizierten Cluster mit den Erkenntnissen aus der explorativen Datenanalyse zu vergleichen. Auf diese Weise können die Resultate beider Ansätze miteinander validiert werden.

Basierend auf den vorgestellten Vorgehensweisen werden in Kapitel 5.2.2.5 konkrete Analysen und Kennzahlen vorgestellt, anhand derer systematisch Cluster für die Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten identifiziert werden können. Dazu werden die drei Ebenen Anlagen-, Werkzeug- und Produktebene unterschieden, die nachfolgend detailliert vorgestellt werden.

Grobanalyse – Anlagen-, Werkzeug- und Produktebene

Die Grobanalyse wird auf die Anlagen-, Werkzeug- und Produktebene angewendet. Die Dreiteilung kann mit verschiedenen Faktoren begründet werden. Zum einen bietet jede Ebene eine spezifische Sicht auf den Werkzeugeinsatz und ermöglicht dadurch die zielgerichtete Analyse bestimmter Aspekte der Werkzeugnutzung. Zum anderen sind nicht alle Daten auf jeder Ebene gleichermaßen relevant, weshalb eine segmentierte Betrachtung ermöglicht, sich auf die relevanten Daten und Kennzahlen zu konzentrieren, und damit eine flexible Herangehensweise an die Analyse bietet. Dazu bietet die Dreiteilung eine holistische Sichtweise. Während jede Ebene für sich spezifische Erkenntnisse generiert, ergibt die kombinierte Analyse aller drei Ebenen ein umfassendes Bild der Werkzeugkosten und deren Potenziale zur Reduktion. Auf der Anlagenebene konzentriert sich die Analyse auf die Anlageninfrastruktur, in der die Werkzeuge eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang werden die Kennzahlen erfasst, die die Stillstandzeiten und die Effizienz der Anlage in Bezug auf den Werkzeugeinsatz beschreiben. Die Werkzeugebene adressiert direkt die charakteristischen Merkmale und die Performance der jeweiligen Werkzeuge. Beispielsweise können hier Eigenschaften wie die Standmenge eines Werkzeugs, die Anzahl der mit ihm gefertigten Produkte oder die spezifischen Ausfallgründe analysiert werden. Auf der Produktebene steht das Endprodukt im Mittelpunkt der Analyse. Hierbei werden Kennzahlen in Bezug auf die Werkzeuglebenszykluskosten der mit einem

⁶⁴⁵ Vgl. Frades; Matthiesen (Overview on techniques in cluster analysis), 2010, S. 83-100.

bestimmten Werkzeug hergestellten Produkte betrachtet. Die genannten beispielhaften Kennzahlen werden in Kapitel 5.2.2.5 noch detaillierter erläutert und die Anforderungen an den Datensatz für die Nutzung dieser dargelegt.

Grobanalyse – Anforderungen an den Datensatz

Aufbauend auf das vorgestellte methodische Fundament sowie die drei vorgestellten Anwendungsebenen werden abschließend die Anforderungen an den Datensatz abgeleitet. Hinsichtlich der Art der Daten genügen diskrete Daten der Kategorie 1, da die Grobanalyse als Grundlage der Feinanalyse dient und zunächst nur dazu dient, Zusammenhänge aufzeigen, die sich aus den in den diskreten Daten gegebenen Informationen darstellen lassen. Technische Prozessparameter sind in dieser Phase noch nicht von Relevanz und bleiben daher unberücksichtigt. In Bezug auf die Vollständigkeit ist eine mittlere Vollständigkeit der Daten ausreichend, da für die später in Kapitel 5.2.2.5 vorgestellten Kennzahlen keine Machine Learning Modelle trainiert werden müssen. Es sollte beachtet werden, dass auch bei der Visualisierung von Daten falsche Zusammenhänge erkannt werden können, falls relevante Daten fehlen. Für die Aktualität der Daten ist eine mäßige Aktualität ausreichend. Echtzeitdaten werden nicht benötigt, da die Kennzahlen nicht auf eine ständige Aktualisierung angewiesen sind. Nicht aktuelle Daten erfüllen die Anforderung hingegen nicht, da diese nicht die gegenwärtige Situation beschreiben und möglicherweise veraltete Probleme oder Optimierungspotenziale darstellen. In Bezug auf den Informationsaustausch zwischen Serienproduzent und Werkzeugbau wird ein partieller Informationsaustausch erfordert, damit sichergestellt ist, dass die relevantesten Informationen zwischen beiden Parteien ausgetauscht und analysiert werden können. Im Rahmen der Detaillierung der verschiedenen Kennzahlen der Grobanalyse in Kapitel 5.2.2.5 wird jeweils im Detail vorgestellt, welche spezifischen Parameter für die Visualisierung benötigt werden.

Grobanalyse – Zusammenfassung

Die Grobanalyse stellt einen essenziellen Bestandteil der hier diskutierten Untersuchung dar und folgt den Prinzipien einer explorativen Datenanalyse. Kern dieses Ansatzes ist die Entwicklung eines fundierten Verständnisses für den vorhandenen Datensatz. Dies erfordert eine intensive Beschäftigung mit der Datenstruktur, ihren Eigenschaften und den innewohnenden Zusammenhängen. Auf diese Weise können potenzielle Trends, Anomalien oder charakteristische Muster innerhalb der Daten erkannt werden. Die Breite der Analyse umfasst diverse Ebenen, einschließlich der Anlagen-, Werkzeug- und Produktebene. Diese mehrschichtige Vorgehensweise ermöglicht nicht nur eine generelle Übersicht über den Datensatz, sondern fördert ebenso spezifische Einsichten in einzelne Kategorien und deren interaktive Beziehungen. Ein primärer Fokus der Untersuchung liegt auf dem Erkennen und Verstehen von Datenstrukturen. Unter Einsatz verschiedener Visualisierungstechniken und statistischer Methoden ist es möglich, verschiedene Cluster innerhalb des Datensatzes zu identifizieren. Das Vorhandensein dieser Cluster erleichtert die Interpretation von Datenzusammenhängen und ermöglicht eine konzentrierte Analyse von spezifischen Datenkategorien innerhalb des umfassenden Datensatzes. Ein Hauptziel der Grobanalyse besteht darin, bestimmte Anlagen, Werkzeuge und Produkte auszumachen, die in einer nachfolgenden, detaillierteren Feinanalyse genauer

betrachtet werden sollten. Hierbei geht es insbesondere um eine Priorisierung. Es soll festgestellt werden, welche Fragestellungen oder Probleme primär angegangen werden sollten und wo das größte Potenzial für Optimierungen liegt. Zusammengefasst dient die Grobanalyse nicht nur der tiefen Kenntnisnahme des Datensatzes, sondern sie schafft auch ein solides Fundament für die anschließende Feinanalyse, die auf den während der Grobanalyse gewonnenen Erkenntnissen basiert. Auf die Erläuterung der Grobanalyse folgt im weiteren die Erläuterung der Feinanalyse.

Szenario Feinanalyse

Im Anschluss an die Grobanalyse erfolgt die Feinanalyse, welche auf den erarbeiteten Erkenntnissen aufbaut und einen vertiefenden Ansatz verfolgt. Während das Hauptaugenmerk der Grobanalyse darauf lag, eine generelle Übersicht über den vorhandenen Datensatz zu verschaffen und bestehende Muster zu identifizieren, wird mit der Feinanalyse das primäre Ziel verfolgt, detaillierte Einblicke in die identifizierten Cluster, Strukturen und Anomalien zu erhalten und die zugrundeliegenden Ursache-Wirkungszusammenhänge der während der Grobanalyse identifizierten Muster systematisch zu erforschen. Hierzu wird auf spezifische Analysewerkzeuge zurückgegriffen, die eine umfassende und tiefgehende Untersuchung ermöglichen. Im Kontext der Feinanalyse werden nachfolgend die vier Aspekte Ursache-Wirkungsanalyse, Trade-off Modellwahl, Modelle für Daten der Kategorie 1 und Modelle für Daten der Kategorie 2 vorgestellt, die in der nachfolgenden Abbildung 125 dargestellt sind.



Abbildung 125: Vier Aspekte der Feinanalyse⁶⁴⁶

Feinanalyse – Ursache-Wirkungsanalyse

Zu Beginn der Feinanalyse wird mit Hilfe eines Ishikawa-Diagramms eine einfache, kontext-bezogene Ursachen-Wirkungsanalyse durchgeführt. Für die erfolgreiche Umsetzung dieser Analyse ist es unabdingbar, auf die vorhandene Werkzeugbau-Expertise innerhalb des Unternehmens zurückzugreifen. Die Ergebnisse, die durch das Ishikawa-Diagramm erzielt werden, können zudem mit den Resultaten der Machine Learning Modelle verglichen werden. Dies dient dazu, die Konformität der Modellergebnisse mit der Werkzeugexpertise sicherzustellen.

⁶⁴⁶ Eigene Darstellung

und ihre technische Sinnhaftigkeit zu überprüfen. Umgekehrt können Modellergebnisse ebenfalls dazu beitragen, Theorien, die im Rahmen des Ishikawa-Diagramms aufgestellt worden sind, zu validieren.

Feinanalyse – Trade-off Modellwahl

Innerhalb des Rahmens der Feinanalyse kommen verschiedene Machine Learning Modelle zum Einsatz. Bei der Auswahl dieser Modelle ist jedoch nicht allein die Eignung des Datensatzes entscheidend. Ein weiterer bedeutender Aspekt ist der Trade-Off zwischen Interpretierbarkeit und Performance der Modelle.

Die Performance eines Machine Learning Modells bezieht sich auf die Richtigkeit seiner Vorhersagen. In der Praxis stellt sich oft die Herausforderung, ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Performance im Sinne der Vorhersagegenauigkeit eines Modells und seiner Interpretierbarkeit zu finden. Auf der einen Seite stehen komplexe Modelle wie künstliche neuronale Netze oder Support Vector Machines, die häufig durch hohe Vorhersagegenauigkeiten überzeugen. Allerdings werden diese Modelle aufgrund ihrer nicht-linearen Strukturen und der resultierenden Komplexität oft als "Black-Box Modelle" bezeichnet. Das bedeutet, dass sie zwar präzise Vorhersagen treffen können, die zugrundeliegenden Entscheidungskriterien aber für den menschlichen Analytiker oft schwer greifbar sind. Auf der anderen Seite gibt es einfach strukturierte Modelle wie die lineare Regression oder Decision Trees. Ihre Stärke liegt in ihrer hohen Interpretierbarkeit, die es ermöglicht, klare Zusammenhänge zwischen den Eingangsvariablen und der Zielvariablen zu erkennen. Jedoch können diese Modelle bei der Analyse komplexer, nicht-linearer Beziehungen oder sehr großen Datenmengen in ihrer Performance limitiert sein.⁶⁴⁷ Je nach Kontext und Zielsetzung kann entweder die reine Vorhersagegenauigkeit im Vordergrund stehen oder aber die Notwendigkeit, Entscheidungsprozesse transparent und nachvollziehbar zu kommunizieren. Diese Abwägung ist unternehmensspezifisch und kann von diversen Faktoren beeinflusst werden wie beispielsweise vorangegangenen Erfahrungen in Data Analytics Projekten, den Kompetenzen der Mitarbeitenden oder dem Angebot interner Schulungen zum Aufbau oder der Stärkung dieser Fähigkeiten. Darüber hinaus kann die strategische Ausrichtung des Unternehmens in Bezug auf die Datenanalyse eine Rolle spielen, da komplexere Modelle oft höhere Ressourceneinsätze erfordern. Insbesondere für Unternehmen ohne vorherige Erfahrung kann es ratsam sein, trotz eines vielversprechenden Datensatzes sowohl komplexe als auch einfache Modelle einzusetzen, um die zugrundeliegenden Zusammenhänge besser verstehen zu können. Letztendlich ist das Verständnis dieses Trade-offs von zentraler Bedeutung, um ein optimales Gleichgewicht zwischen Genauigkeit und Interpretierbarkeit zu finden und somit fundierte Entscheidungen bezüglich der Modellauswahl zu treffen. In der nachfolgenden Abbildung 126 ist der Trade-off zwischen Interpretierbarkeit und Performance dargestellt.

⁶⁴⁷ Vgl. Brandstätter et al. (Certification of AI-Supported Production Processes), 2019, S. 558-559.

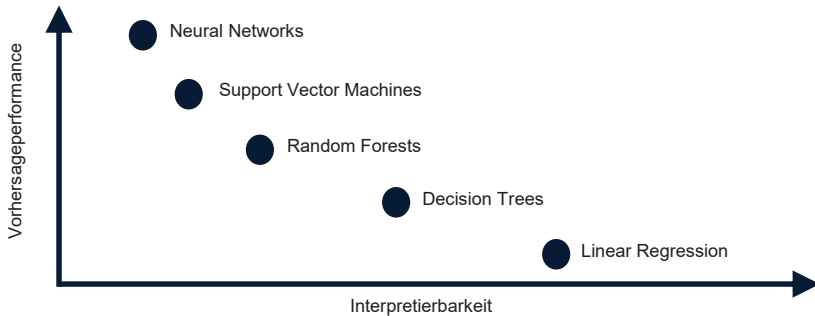


Abbildung 126: Trade-off zwischen Interpretierbarkeit und Performance⁶⁴⁸

Feinanalyse – Modelle für Daten der Kategorie 1

Die Modelle werden aufgrund der grundlegenden Verschiedenheit der Daten in Modelle für Daten der Kategorie 1 und Modelle für Daten der Kategorie 2 eingeteilt. Für Daten der Kategorie 1 wird die Analysestruktur der Grobanalyse beibehalten, wobei Zielgrößen wie die Werkzeugverfügbarkeit oder die voraussichtliche Reststandmenge einer Werkzeugkomponente prognostiziert werden. Spezifikationen und Anforderungen variieren je nach Modellkomplexität. Für die Modellierung von Daten der Kategorie 1 wird zwischen den drei eingeführten Ebenen Anlage-, Werkzeug- und Produktebene differenziert. Bei der Betrachtung dieser Daten wird eine Auswahl verschiedener Algorithmen in Erwägung gezogen. Hierbei ist anzumerken, dass die Wahl des spezifischen Algorithmus stark von der vorliegenden Datenqualität beeinflusst wird. Parallel dazu sind die Erwartungen und Ziele, die mit diesen Algorithmen verbunden sind, definiert. Demgegenüber liegt der Fokus bei der Modellierung der Daten aus Kategorie 2 auf den Bereichen der sensordatenbasierten Prognose und aktorbasierten Adaption. Hierbei ist Verständnis für die unterschiedlichen Zielsetzungen, die diesen beiden Ansätzen zugrunde liegen, von zentraler Bedeutung. Entsprechend werden die spezifischen Anforderungen an die Werkzeuge und Methoden für diese Ansätze definiert. Letztlich dient diese methodische Trennung der Gewährleistung, dass die ausgewählten Modelle und Analyseverfahren ideal auf die jeweiligen Dateneigenheiten und -anforderungen abgestimmt sind. Dies ist essenziell, um valide und robuste Ergebnisse zu erzielen.

In der explorativen Analyse für die Anlagenebene wird primär auf die Darstellung der Stillstandzeiten Wert gelegt.⁶⁴⁹ Durch die Multiplikation dieser Zeiten mit den Anlagenstundensätzen lässt sich die Kostenbelastung durch werkzeugbedingte Stillstände präzise quantifizieren. Im Bestreben, diese Kosten zu minimieren, besteht die Möglichkeit, Einflussfaktoren auf diese

⁶⁴⁸ Vgl. Brandstätter et al. (Certification of AI-Supported Production Processes), 2019, S. 559.

⁶⁴⁹ Detaillierte Ausführungen dazu folgen in Kapitel 5.2.2.5

Stillstände zu analysieren und zukünftige Stillstände zu prognostizieren. Dies ermöglicht strategische Maßnahmen abzuleiten und zu identifizieren, welche Kombinationen aus Anlagen, Werkzeugen und Produkten zu den minimalen Stillstandszeiten führen. Diese Vorgehensweise zielt darauf ab, die Verfügbarkeit der Anlagen zu erhöhen und die damit verbundenen Kosten zu senken. Somit prognostiziert das Machine Learning Modell auf der Anlagen- und Produktebene die Stillstandszeiten in Bezug auf die Anlagenart oder auf den Produkttyp. Modelle können entweder Anlage und Produkt gemeinsam als erklärende Variablen berücksichtigen, wodurch ein allumfassendes Modell entstehen würde, oder separat für jede Anlage oder Produkt trainiert werden. Ein universelles Modell bietet den Vorteil einer vereinfachten Implementierung und schnelleren Einsatzbereitschaft. Allerdings könnte die Interpretierbarkeit durch die Menge an erklärenden Variablen leiden. Demgegenüber verbessert die Erstellung separater Modelle die Klarheit und Interpretierbarkeit, obwohl dies durch das Training verschiedener Modelle mit einem komplexeren und zeitaufwendigeren Prozess verbunden ist. Die notwendigen Parameter für solch ein Modell umfassen Daten über bisherige Stillstände, Fertigungsaufträge, verwendete Werkzeuge, Anlagen und produzierte Produkte sowie gegebenenfalls den Erfahrungsgrad des Anlagenbedieners.

Auf der Werkzeugebene konzentriert sich die explorative Analyse hauptsächlich auf die Darstellung der Standmengenabweichung, die die prozentuale Abweichung zwischen der erreichten Ist- und zu erwartenden Soll-Standmenge eines Werkzeugs repräsentiert.⁶⁵⁰ Machine Learning Modelle werden hier eingesetzt, um die Standmenge der Werkzeuge vorherzusagen, wodurch größere Differenzen zwischen dem Ist- und dem Soll-Wert vermieden und die Planungseffizienz verbessert wird. Die erforderlichen Parameter für diese Modellvorhersage beinhalten Daten über bisherige Standmengenabweichungen, Fertigungsaufträge, verwendete Werkzeuge, verwendetes Rohmaterial, verwendete Anlage, produzierte Produkte, sowie möglicherweise eine Historie des Werkzeugs. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Parameter lediglich als Richtlinie dienen und keine definitive Bestimmung der Anzahl und Art der Parameter, die erfasst werden müssen, darstellt. Unternehmen könnten sich dafür entscheiden, zusätzliche Parameter in die Modelle einzubeziehen oder einige davon auszulassen. Solche Entscheidungen könnten die Modellperformance beeinflussen, die später im Evaluierungsteil der Feinanalyse genauer betrachtet wird. Dies gilt sowohl für Modelle auf Anlagen- und Produktebene als auch auf der Werkzeugebene. Da es sich bei den beiden vorgestellten Prognosen um ein Regressionsproblem handelt, können für beide Modelle prinzipiell die gleichen Algorithmen verwendet werden, die dann je nach Zielsetzung auf Basis anderer Daten trainiert werden.

Die Wahl des richtigen Algorithmus hängt stark von der Datenqualität ab, wobei verschiedene Algorithmen unterschiedliche Komplexitätsgrade aufweisen. Im Kontext dieser Arbeit werden die Algorithmen in drei Kategorien eingeteilt. Zum einen bestehen einfach verständliche Algorithmen mit geringerer Performance, wobei die Lineare Regression als Beispiel herangezogen wird. Dazu existieren Algorithmen mittlerer Komplexität und Performance, hierbei sticht besonders der Random Forest hervor. Abschließend bestehen schwer interpretierbare Algorithmen

⁶⁵⁰ Detaillierte Ausführungen dazu folgen in Kapitel 5.2.2.5

wie künstliche neuronale Netze, die allerdings eine hohe Performance bieten. Die Anforderungen an die Datenqualität variieren in Abhängigkeit von dem angewendeten Modell. Diese Anforderungen müssen präzisiert werden, um das geeignetste Modell für die jeweiligen Gegebenheiten eines Unternehmens zu ermitteln. Wenngleich weniger komplexe Modelle tendenziell schlechtere Ergebnisse produzieren, gestatten sie eine vereinfachte Evaluierung der Wirkzusammenhänge. Je nach verwendetem Algorithmus variieren die Ansprüche an das Kriterium der Vollständigkeit der Daten.

Die lineare Regression basiert auf parametrischen Annahmen bezüglich der Datenstruktur.⁶⁵¹ Daher ist diese Methode besonders anfällig für unvollständige Daten, sodass bereits bei einem Anteil von über 10 % fehlender Daten keine zuverlässigen Ergebnisse mehr erzielt werden können.⁶⁵² Daher ist für die lineare Regression eine hohe Vollständigkeit essenziell. Von den drei besprochenen Algorithmen zeigt die lineare Regression die höchste Sensibilität gegenüber Datenlücken. Im Gegensatz dazu können Random Forests (RF) in gewissem Maße mit fehlenden Daten umgehen.⁶⁵³ Allerdings sollten auch bei diesem eine bestimmte Obergrenze an fehlenden Daten nicht überschritten werden.⁶⁵⁴ Im Idealfall sollte bei einem RF-Modell die Vollständigkeit als hohe oder mittlere Vollständigkeit eingestuft werden. Während Random Forests recht anfällig für fehlende Daten sind, haben neuronale Netze die Fähigkeit, selbst mit einem gewissen Grad an Unvollständigkeit umzugehen, insbesondere wenn der Datensatz ausreichend groß dimensioniert ist und die Datenlücken nicht systematisch auftreten. Neuronale Netze sind robust gegenüber fehlenden oder verzerrten Daten und sind in der Lage, komplexe Beziehungen in diesen zu erkennen, was ihren Einsatz vor allem bei nicht linearen Zusammenhängen vorteilhaft macht.⁶⁵⁵ Dennoch gilt wie bereits zuvor erwähnt, je besser die Datenqualität und Vollständigkeit, desto besser ist in der Regel die Performance des Modells, unabhängig von der Algorithmus-Art.

Ein weiterer Aspekt der Datenqualität ist die Datenaktualität. Diese spielt eine entscheidende Rolle in der Entwicklung und Implementierung von Maschinenlernmodellen. Nur durch regelmäßige Aktualisierungen können Modelle effektiv auf Veränderungen reagieren und ihre Vorhersagegenauigkeit beibehalten. Es ist jedoch zu beachten, dass nicht in allen Anwendungsfällen Echtzeitdaten erforderlich sind, insbesondere wenn es sich nicht um ständig wechselnde technische Parameter handelt. Im Anwendungskontext reicht es für die Modelle der Kategorie 1 daher, wenn die Daten von mäßiger Aktualität bis aktuell sind. Bezüglich des Informationsaustauschs ist zu betonen, dass dieser vollständig sein muss, um sicherzustellen, dass alle Modelle vollständige Informationen aus Werkzeugbau und Serienproduktion erhalten. Dies ist nicht nur für die lineare Regression relevant, sondern auch für mittlere und hochkomplexe Algorithmen. Abschließend wird auf die Relevanz der Größe des Datensatzes eingegangen.

⁶⁵¹ Vgl. Schmidt; Finan (Linear regression and the normality assumption), 2018, S. 146.

⁶⁵² Vgl. Junger; Ponce de Leon (Imputation of missing data in time series for air pollutants), 2015, S. 102-103.

⁶⁵³ Vgl. Hapfelmeier; Ulm (Variable selection by Random Forests using data with missing values), 2014, S. 136.

⁶⁵⁴ Vgl. van Echelpoel; Goethals (Variable importance for sustaining macrophyte presence via random forests: data imputation and model settings), 2018, S. 5.

⁶⁵⁵ Vgl. Traeger et al. (Künstliche neuronale Netze. Theorie und Anwendungen in der Anästhesie, Intensiv- und Notfallmedizin), 2003, S. 1057.

Insbesondere für neuronale Netze ist die Größe des Datensatzes entscheidend. Der Datensatz sollte ausreichend groß sein, um ein erfolgreiches Training des Modells zu gewährleisten.⁶⁵⁶ Obwohl es keine feste Regel für die erforderliche Größe gibt, deuten Daumenregeln darauf hin, dass die Anzahl der Datenpunkte mindestens 10- bis 100-mal so groß sein sollte wie die Anzahl der Features. Wird diese Regel nicht erfüllt, ist es möglicherweise nicht ratsam, ein neuronales Netz im Anwendungszusammenhang zu trainieren.

Feinanalyse – Modelle für Daten der Kategorie 2

Bei der Modellerstellung für Daten der Kategorie 2 wird zwischen der sensordatenbasierten Prognose und der aktorbasierten Adaption unterschieden. Im Anwendungszusammenhang bedeutet dies die Unterscheidung zwischen Predictive und Preventive Maintenance in Bezug auf das Werkzeug während der Nutzungsphase. Bei Predictive Maintenance ist es das Ziel, Werkzeugausfälle und damit werkzeugbedingte Produktionsstillstände zu prognostizieren und die zugrundeliegenden Fehlerquellen zu identifizieren, um eine effektive Werkzeuginstandhaltungsstrategie zu implementieren. Preventive Maintenance geht noch einen Schritt weiter und beinhaltet zusätzlich eine automatische aktorbasierte Anpassung von Produktionsparametern zur Vermeidung von Ausfällen ohne menschlichen Eingriff.⁶⁵⁷ Die Unterschiede zwischen den beiden Konzepten bestehen prinzipiell nicht in den benötigten Daten, sondern in der Intelligenz der Werkzeuge. Während Werkzeuge bei Predictive Maintenance mit Sensoren ausgestattet sind, um die Daten in Echtzeit zu erfassen, müssen die Werkzeuge bei Preventive Maintenance zusätzlich zu der Sensorik auch mit Aktorik ausgestattet werden. Diese Aktoren ermöglichen die automatische Korrektur der Fehlerquellen, bevor diese zu Fehlern führen. Somit können Wartungen hinausgezögert oder möglicherweise komplett vermieden werden.⁶⁵⁸ Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass keine universelle, optimale Bewertungsmetrik existiert. Folglich müssen diverse Metriken, sowohl dimensionslose als auch solche mit spezifischer Einheit, im Kontext des Anwendungsfalls interpretiert werden, um deren Relevanz und Signifikanz korrekt einschätzen zu können.⁶⁵⁹

Bei der Umsetzung von Predictive oder Preventive Maintenance ist die Qualität und Art der Daten von entscheidender Bedeutung. Für diese Anwendungen ist es erforderlich, dass die Daten, die ein Unternehmen erhebt, der Kategorie 2 entsprechen. Diese Prozessdaten müssen sensorbasiert erfasst werden und eine Vielfalt an werkzeugspezifischen Parametern beinhalten. Durch die sensorbasierte Erfassung dieser Parameter können tiefe Einblicke in den Zustand von Maschinen und Werkzeugen gewonnen werden, dies ermöglicht die frühzeitige Erkennung von Abweichungen und Anomalien. Eine Kategorisierung der Daten beispielsweise in Dimensionen wie Produktionsmaschine, Werkzeugzustand und Material erzeugt ein detailliertes Bild des gesamten Produktionsprozesses. Weiterhin ermöglicht die Berücksichtigung

⁶⁵⁶ Vgl. Alwosheel et al. (Is your dataset big enough? Sample size requirements when using artificial neural networks for discrete choice analysis), 2018, S. 168.; Vgl. Jain; Chandrasekaran (39 Dimensionality and sample size considerations in pattern recognition practice), 1982, S. 835-855.

⁶⁵⁷ Vgl. Schuh et al. (Predictive Maintenance), 2020, S. 8.

⁶⁵⁸ Vgl. Boos et al. (Intelligente Werkzeuge und datenbasierte Geschäftsmodelle), 2018, S. 13.

⁶⁵⁹ Vgl. Botchkarev (Performance Metrics (Error Measures) in Machine Learning Regression, Forecasting and Prognostics: Properties and Typology), 2018, S. 5-6.

individueller Betriebsbedingungen und Verschleißmuster eine gezielte Ausrichtung von Instandhaltungsstrategien. Somit sind Daten der Kategorie 2 unerlässlich für genaue Vorhersagen und rechtzeitige präventive Instandhaltungsplanungen.

Ein weiterer kritischer Aspekt ist die Vollständigkeit der Daten. Hierbei ist eine hohe bis sehr hohe Vollständigkeit notwendig, um die Integrität der Vorhersagen zu gewährleisten und umfassende Analysen durchzuführen. Jede fehlende Information in diesem Kontext könnte sich als potenzielles Risiko erweisen, das die Effektivität von Instandhaltungsmaßnahmen beeinträchtigen könnte. In Bezug auf die Datenaktualität sind Echtzeitdaten von zentraler Bedeutung. Diese sind essenziell, um unmittelbar auf jegliche Abweichungen reagieren zu können, wodurch potenzielle Ausfallzeiten minimiert werden. Es ist entscheidend, dass die Daten kontinuierlich über die Zeit hinweg erfasst werden, um sicherzustellen, dass alle Zustandsparameter korrekt erfasst werden und die anschließende Analyse ermöglicht wird. Schließlich ist auch der Informationsaustausch von großer Relevanz. Ein vollständiger Informationsaustausch stellt sicher, dass alle relevanten Daten synchronisiert sind. Dies fördert eine kohärente Entscheidungsfindung und garantiert, dass alle Wartungsaktivitäten auf dem neuesten Stand der verfügbaren Daten basieren.

Wenn die zuvor dargelegten Anforderungen an den Datensatz erfüllt sind, eröffnen sich zwei spezifische Analysemöglichkeiten. Diese sind Predictive Maintenance und Preventive Maintenance. Beide Ansätze zielen darauf ab, die in der Grobanalyse sowie in der Analyse der Kategorie 1 gewonnenen Erkenntnisse zu vertiefen. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Identifikation der Gründe für den Werkzeugausfall. Auf Basis dieser Erkenntnisse sollen entsprechende Strategien und Vorhersagen entwickelt werden, um Werkzeugausfälle zu minimieren, Stillstandzeiten zu reduzieren und die Standmengen präzise vorherzusagen. Nach SCHUH ET AL. besteht das Hauptziel von Predictive Maintenance darin, Wartungsarbeiten genau dann durchzuführen, wenn sie tatsächlich benötigt werden. Dieser Ansatz ermöglicht eine detaillierte Prognose, die die Antizipation möglicher Störungen erlaubt. Dadurch wird eine gezielte zeitliche Koordinierung sowohl der Wartung als auch der komponentenspezifischen Instandsetzung möglich. Ein bedeutender Vorteil von Predictive Maintenance besteht in der präventiven Handlungsweise gegenüber Störungen, bevor sie tatsächlich eintreten. Somit können potenzielle Produktionsausfälle antizipiert und durch proaktive Planung und zeitnahe Instandhaltungsaktivitäten effektiv verhindert werden. Dies minimiert unerwartete Maschinenstillstände und spart Wartungskosten. Es ist jedoch anzumerken, dass für die erfolgreiche Implementierung von Predictive Maintenance ein umfassendes Fachwissen notwendig ist. Bei konsequenter Umsetzung kann jedoch eine signifikante Reduzierung der Instandhaltungskosten erreicht werden.

Das Hauptziel von Preventive Maintenance ist es, potenzielle Fehlerquellen frühzeitig zu identifizieren und automatisch zu beheben, bevor sie zu Ausfällen führen. Hierbei sind, anders als bei der Predictive Maintenance, nicht nur Sensoren, sondern auch Aktoren erforderlich. Diese ermöglichen es Maschinen und Anlagen, basierend auf den erfassten Daten, selbstregulierende Aktionen durchzuführen. Für eine erfolgreiche präventive Instandhaltung ist es essenziell, dass Maschinen eigenständig auf Veränderungen im Produktionsprozess reagieren und

entsprechend agieren können. Dies erlaubt, Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen zu verzögern oder sogar zu verhindern. Um den Werkzeugverschleiß zu minimieren, müssen Maschinenparameter situationsbedingt angepasst werden. Eine effiziente präventive Instandhaltungsstrategie erfordert zudem eine schnelle Reaktion bei Maschinenstillständen, die durch Werkzeugschäden verursacht werden. Eine tiefgreifende Kenntnis über die Verschleißmechanismen der eingesetzten Werkzeuge ist hierbei unerlässlich. Es ist zu beachten, dass eine erfolgreiche Implementierung von Predictive Maintenance oft eine Grundvoraussetzung für die Anwendung von präventiven Instandhaltungsstrategien ist.⁶⁶⁰ Somit bestehen die primären Unterschiede darin, dass Predictive Maintenance primär auf der aktuellen Zustandsüberwachung und Prognose basiert, während Preventive Maintenance durch die Integration von Akteuren eine selbstregulierende Wartung ermöglicht.

Obwohl die Anforderungen bezüglich des Datensatzes für beide Konzepte identisch sind, gibt es in Bezug auf die Werkzeuge erhebliche Unterschiede. Predictive Maintenance erfordert Werkzeuge, die in der Lage sind, Daten in Echtzeit mittels Sensoren zu erfassen. Preventive Maintenance hingegen benötigt sowohl Sensoren zur Datenerfassung als auch Akteure, die regulierend eingreifen können. Die Auswahl der Sensoren sollte basierend auf den spezifischen Prozessparametern erfolgen, die vom jeweiligen Werkzeug abhängig sind. Laut Boos lassen sich Sensoren grundsätzlich in sechs Dimensionen unterteilen: Statische Genauigkeit, dynamisches Verhalten, Messbereich, Überbelastbarkeit, Umwelteinflüsse und Zuverlässigkeit.⁶⁶¹ Die genauen Auswahlkriterien für die Sensoren liegen jedoch außerhalb des Fokus dieser Arbeit.

Feinanalyse – Zusammenfassung

Mit der Feinanalyse wird das Ziel verfolgt, auf Grundlage des klassifizierten Datensatzes potenzielle Modelle zu entwickeln und anzuwenden. Der gewählte Ansatz stützt sich dabei konsequent auf die Erkenntnisse und Ergebnisse der vorangegangenen Grobanalyse. Mit den im Rahmen der Feinanalyse entwickelten Modellen wird angestrebt, präzise Prognosen in Bezug auf die Standmengen der Werkzeuge sowie die Dauer von Maschinenstillständen zu erstellen. Darüber hinaus soll die Erarbeitung einer optimierten und effizienteren Wartungsstrategie erfolgen. Ein wesentliches Element dieser Feinanalyse besteht in der Identifizierung und im Verständnis der zugrundeliegenden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge, die maßgeblich die Entscheidungsfindung unterstützen. Es ist von essenzieller Bedeutung jene determinierenden Faktoren herauszuarbeiten, die zu Werkzeugausfällen und damit zu werkzeugbedingten Produktionsstillständen führen. Durch deren Analyse können zielgerichtete Maßnahmen initiiert werden, um die genannten negativen Effekte zu minimieren. Sollten die entwickelten Modelle nicht die antizipierte oder erhoffte Performance aufweisen, können die aufgezeigten Schritte iterativ durchlaufen werden, um die Vorhersagegenauigkeit zu steigern, bis der gewünschte Zielzustand erreicht ist.

Evaluierung der Modelle

⁶⁶⁰ Vgl. Schuh et al. (Predictive Maintenance), 2020, S. 8.

⁶⁶¹ Vgl. Boos et al. (Intelligente Werkzeuge und datenbasierte Geschäftsmodelle), 2018, S. 13-16.

Nachdem die Modelle sowohl für die Daten der Kategorie 1 als auch für die Daten der Kategorie 2 erstellt worden sind, müssen diese, bevor sie in der Praxis angewendet werden können, noch evaluiert werden. Da es sich bei allen Modellen um Regressionsmodelle handelt, das Ergebnis somit ein Zahlenwert ist können für alle Modelle die gleichen Metriken verwendet werden. Da es nicht die eine perfekte Metrik gibt, werden verschiedene angewandt, um die verschiedenen Fehlercharakteristika der Modelle zu evaluieren. Die klassischen Metriken für Regressionen sind die sogenannten skalenabhängigen Metriken. Dies bedeutet, dass das Ergebnis dieser Metrik eine Einheit besitzt und somit im Zusammenhang mit den Daten und der Einheit an sich ausgewertet werden muss. Somit lässt sich nicht pauschal sagen, welche Werte gut und welche Werte schlecht sind. Dies muss im spezifischen Fall für das analysierte Werkzeug bestimmt werden. Hierbei ist im Rahmen dieser Methodik vor allem die Werkzeugbauexpertise erforderlich. Dazu gibt es noch verschiedene dimensionslose Metriken, welche dadurch entstehen, dass Werte der gleichen Einheit durcheinander geteilt werden, sodass die Einheiten wegfallen. Die folgenden Metriken können beispielsweise im Anwendungszusammenhang angewendet verwendet werden:⁶⁶²

- MAE (Mean Absolute Error) – Mittlerer absoluter Fehler
- MSE (Mean Squared Error) – Mittlerer quadrierter Fehler
- RMSE (Root Mean Squared Error) – Wurzel des mittleren quadrierten Fehlers
- MAPE (Mean Absolute Percentage Error – mittlerer absoluter prozentualer Fehler
- Bestimmtheitsmaß R^2

Für weitergehende Ausführungen zu den Metriken wird auf die bestehende Literatur verwiesen. Zusammengefasst besteht die übergeordnete Zielsetzung für die vorgestellten standardisierten Analyseszenarien darin, die in der Grobanalyse identifizierten Kostentreiber in Bezug auf die Werkzeuglebenszykluskosten zu identifizieren und nachhaltig zu reduzieren. Abschließend wird nachfolgend die Ableitung anforderungsgerechter Kennzahlen inklusive Visualisierungskonzept vorgestellt.

5.2.2.5 Ableitung anforderungsgerechter Kennzahlen

Die Ableitung anforderungsgerechter Kennzahlen und ein entsprechendes Visualisierungskonzept unterstützen die vorgestellten Analyseszenarien. Insbesondere an der Schnittstelle zwischen Grob- und Feinanalyse wird eine kennzahlenbasierte Unterstützung benötigt, welche, der im Rahmen der Grobanalyse identifizierten Cluster, im Rahmen der Feinanalyse tiefergehend analysiert werden sollen, damit die zur Verfügung stehenden Ressourcen für kurz- und langfristige Optimierungen im Anwendungszusammenhang bestmöglich eingesetzt werden können. Dazu werden ausgewählte Zusammenhänge in den drei vorgestellten Ebenen Anlagen-, Werkzeug- und Produktebene anhand spezifischer Kennzahlen visuell aufbereitet. Dazu zählen beispielsweise die Darstellung von werkzeugbedingten Anlagenstillständen, Abweichungen in den Werkzeugstandmengen oder Ausreißer bei den Lebenszykluskosten von

⁶⁶² Vgl. Chicco et al. (The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation), 2021, S. 4.

Werkzeugen pro produziertem Produkt. Verschiedene Filteroptionen wie beispielweise Anlage, Werkzeugtyp oder Stahlsorte erlauben eine spezifische und tiefergehende Datenexploration. Durch die Filter wird die Übersichtlichkeit der Visualisierungen erhöht, eine individualisierte Betrachtung und eine zeiteffizientere Analyse ermöglicht. Die Kennzahlen werden dabei auf verschiedenen Stufen dargestellt, sodass mit jeder Stufe tiefer in die Analyse eingestiegen werden kann.

Die im Folgenden vorgestellten Kennzahlen können mithilfe unterschiedlicher Tools visualisiert werden. Ein Fokus der Visualisierungen liegt insbesondere auf den Filtermöglichkeiten, die es ermöglichen, die betrachtete Datenmenge zu verfeinern und auf spezifische Interessen oder Fragestellungen zuzuschneiden. Daraus ergeben sich eine Reihe von Vorteilen. In umfangreichen Datensätzen können wichtige Informationen leicht übersehen werden. Die Filter erleichtern die Segmentierung und machen somit komplexe Datenmengen übersichtlicher und verständlicher. Zudem können mithilfe von Filtern eigene Schwerpunkte gesetzt und somit maßgeschneiderte Einblicke in die Daten generiert werden, die den individuellen Bedürfnissen entsprechen. Statt alle Daten manuell zu durchsuchen, ermöglichen Filter eine schnelle und gezielte Auswahl, wodurch Zeit gespart und die Effizienz der Analyse gesteigert wird. Insgesamt erhöhen Filtermöglichkeiten die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der im Folgenden dargestellten Visualisierungen, ermöglichen eine tiefere und fokussierte Datendurchdringung und unterstützen somit fundierte Entscheidungsfindung auf Basis der relevanten Informationen. In der nachfolgenden Tabelle 6 sind beispielhaft verschiedene Filter inklusive des Nutzens des Filters dargestellt.

Filter	Nutzen des Filters
Zeitraum	Identifikation von Trends, Anomalien und Entwicklungen für frei wählbare Zeiträume
Anlage	Identifikation von anlagenspezifischen Abweichungen bei den Werkzeuglebenszykluskosten bzw. -daten
Werkzeugtypen	Identifikation von werkzeugtypen- bzw. werkzeuginstanzenspezifischen Abweichungen bei den Werkzeuglebenszykluskosten bzw. -daten
Produkttypen	Identifikation von Produkt(varianten)spezifischen Abweichungen bei den Werkzeuglebenszykluskosten bzw. -daten
Stahlsorte	Identifikation von stahlsortenspezifische Abweichungen bei den Werkzeuglebenszykluskosten bzw. -daten
...	...

Tabelle 6: Beispielhafte Filtermöglichkeiten⁶⁶³

Für die einzelnen Kennzahlen werden im Folgenden die Voraussetzungen, die Analysemöglichkeiten und die verschiedenen Filtermöglichkeiten erläutert.

⁶⁶³ Eigene Darstellung

Anlagenebene

Für die Anlagenebene wird ein zweistufiges Visualisierungskonzept zur Darstellung der Kennzahlen angewandt. In der ersten Stufe wird eine Auswertung der verschiedenen Anlagen hinsichtlich ihrer werkzeugbedingten Gesamtanlageneffektivität (engl. Overall Equipment Effectiveness, OEE), der werkzeugbedingten Stillstandzeiten sowie der daraus resultierenden Stillstandskosten vorgenommen. In der zweiten Stufe werden die detaillierten Gründe für die Anlagenstillstände in Abhängigkeit von den ausgewählten Anlagentypen dargestellt sowie die besten und schlechtesten drei Werte für werkzeugbedingte Stillstandszeiten und Stillstandskosten visualisiert. Nachfolgend werden die einzelnen Kennzahlen detailliert erläutert.

Die Berechnung und Darstellung der werkzeugbedingten OEE-Kennzahlen setzt sich aus verschiedenen Parametern zusammen. Dazu gehören unter anderem die werkzeugbedingten Stillstände, die Ist- und Sollstandmengen der Werkzeuge sowie der mit der Anlage produzierte Ausschuss. Die werkzeugbedingte OEE-Kennzahl bezieht sich konkret auf das in der Anlage verbaute Werkzeug und unterscheidet sich entsprechend von der klassischen OEE-Kennzahl aus dem Produktionsumfeld. Die werkzeugbedingte OEE-Kennzahl zielt darauf ab zu visualisieren, welchen Einfluss das Werkzeug auf die Verfügbarkeit, Leistung und Qualität einer Anlage hat. Darüber hinaus können die Anlagen unter diesem Gesichtspunkt miteinander verglichen werden. Die Berechnung der OEE-Kennzahl setzt sich dabei aus dem Produkt der drei genannten Bestandteile Verfügbarkeit, Leistung und Qualität zusammen⁶⁶⁴. Die Formel sowie die einzelnen Bestandteile sind in der nachfolgenden Tabelle 7 dargestellt.

Bezeichnung	Definition
OEE	Verfügbarkeit x Leistung x Qualität
Verfügbarkeit	Ist-Produktionszeit im Verhältnis zur Soll-Produktionszeit
Leistung	Anzahl der produzierten Teile im Verhältnis zu der theoretisch möglichen Anzahl an produzierten Teilen
Qualität	Anzahl der fehlerfreien Einheiten im Verhältnis zu allen Einheiten

Tabelle 7: Berechnung der OEE-Kennzahl⁶⁶⁵

Darüber hinaus stehen diverse Filtermöglichkeiten beispielsweise für den Zeitraum, den Werkzeugtyp, das Produkt, den Produktionsbereich sowie die Stahlart zur Verfügung. Ausgehend von der OEE Betrachtung der Anlagen bildet die zweite Kennzahl der ersten Analysestufe die Stillstandzeiten der Anlagen in einem Balkendiagramm ab. Um diese Visualisierung zu ermöglichen, müssen die werkzeugbedingten Stillstände der Anlagen bekannt sein. Diese Visualisierung ermöglicht es, unmittelbare Einblicke in die Ausfallzeiten der einzelnen Anlagen zu erhalten. Für eine noch detailliertere Analyse können die Filter analog zu denen der ersten

⁶⁶⁴ Vgl. Nakajima (Introduction to TPM), 1988, S. 21-30.

⁶⁶⁵ Eigene Darstellung

Kennzahl der ersten Analyse implementiert werden. Die finale Kennzahl der ersten Analysestufe erweitert die zweite Kennzahl um die Kosten. Die werkzeugbedingten Stillstandskosten werden in einem Balkendiagramm dargestellt. Dazu gelten die gleichen Bedingungen wie für die Visualisierung der Stillstandzeiten, zusätzlich werden noch die jeweiligen Anlagenstundensätze benötigt. Die Stillstandzeiten werden mit den Anlagenstundensätzen multipliziert und ergeben die Kosten, die durch die werkzeugbedingten Stillstände entstehen. Äquivalente Filteroptionen wie zuvor sind ebenfalls anwendbar. In Summe verfolgt die erste Analysestufe das Ziel, werkzeugbedingte Effizienzunterschiede zwischen den Anlagen herauszuarbeiten und die finanziellen Implikationen von werkzeugbedingten Anlagenstillständen zu quantifizieren.

Basierend auf den ersten drei Kennzahlen können durch den Anwendenden im zweiten Schritt verschiedene Anlagen ausgewählt werden, um diese auf der zweiten Analysestufe tiefergehend zu analysieren. Die Werte der zweiten Analysestufe werden entsprechend auf die ausgewählten Anlagen eingegrenzt. Wird beispielsweise Anlage 2 ausgewählt, wird die Anzahl der Ausfälle auf der x-Achse, die Stillstandszeiten auf der y-Achse, der Grund des Ausfalls durch die Wahl der Farbe und die Kosten für die werkzeugbedingten Produktionsausfälle durch die Größe der Kreise visualisiert. Die Filtermöglichkeiten sind analog zu den zuvor genannten Filtermöglichkeiten. Das Ziel der zweiten Analysestufe ist es, präventive Maßnahmen basierend auf den erkannten Ausfallgründen priorisieren zu können. Insgesamt ermöglicht die Visualisierung und Analyse dieser Kennzahl, die ausgewählte Anlage oder Anlagen näher zu betrachten und die Gründe für die werkzeugbedingten Stillstände nach Stillstandszeit, Stillstandsgrund, Anzahl der Stillstände oder Stillstandskosten zu analysieren. Zur Übersicht über die Anlagen werden die jeweils drei besten und schlechtesten Anlagen in Bezug auf die Stillstandszeiten und die Stillstandskosten dargestellt. Das Gesamtziel der Anlagenebene ist die Identifikation von Anlagen mit einer unterdurchschnittlichen werkzeugbedingten OEE-Kennzahl, erheblichen Stillstandszeiten, einer großen Anzahl an werkzeugbedingten Anlagenstillständen sowie hohen werkzeugbedingten Stillstandskosten, um systematisch den Bedarf für eine anschließende Feinanalyse bewerten zu können. Die Kennzahlen der Anlagenebene sind in der nachfolgenden Abbildung 127 dargestellt.

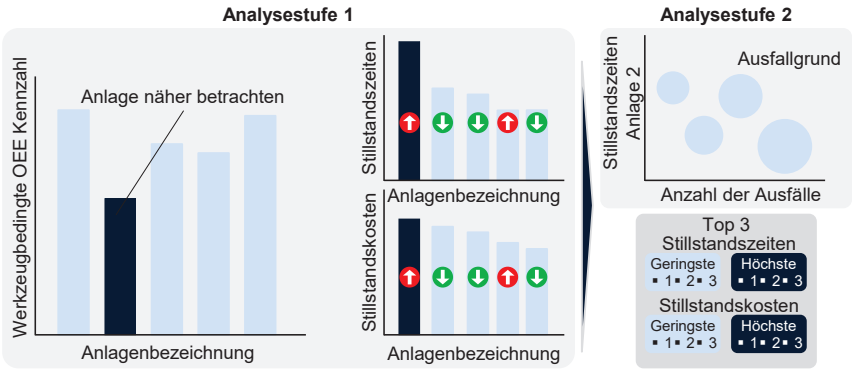


Abbildung 127: Kennzahlen der Anlagenebene⁶⁶⁶

Werkzeugebene

Im Visualisierungskonzept für die Werkzeugebene sind drei Analyseebenen vorgesehen. Zunächst werden die diversen Werkzeugtypen untersucht. Basierend auf den Resultaten dieser ersten Phase werden in der zweiten Stufe die Werkzeuginstanzen evaluiert. Schließlich werden in der dritten Stufe die Gründe für Werkzeugausfälle beleuchtet. Dieser Prozess erlaubt eine progressive Analyse des Datensatzes, beginnend bei der übergeordneten Werkzeugtypenebene bis hin zu den spezifischen Ausfallursachen.

Im Rahmen der primären Analysestufe werden mittels eines Streudiagramms (engl. Scatterplots) die Standmengenabweichungen der verschiedenen Werkzeugtypen im Verhältnis zu den absoluten Werkzeuglebenszykluskosten dargestellt. Die Größe der Kreise repräsentiert dabei die Anzahl der Werkzeuginstanzen je Werkzeugtyp. Hierdurch können Werkzeugtypen mit signifikant hohen Werkzeuglebenszykluskosten und entsprechenden Standmengenabweichungen identifiziert werden. Filteroptionen beinhalten beispielsweise Kriterien wie Zeitraum, Anlage, Produkt und Stahlart. Für die Visualisierung dieser Kennzahl sind die Ist- und Sollstandmengen, die absoluten Werkzeuglebenszykluskosten sowie die Anzahl der Instanzen pro Werkzeugtyp erforderlich. Die zweite Kennzahl visualisiert die Werkzeuglebenszykluskosten mit Hilfe eines Boxplots und bietet zudem die Möglichkeit, die einzelnen Komponenten bzw. Phasen der Werkzeuglebenszykluskosten separat zu visualisieren. Somit können die Werkzeugtypen identifiziert werden, die in einer oder mehreren Werkzeuglebenszyklusphasen besonders hohe Werkzeuglebenszykluskosten haben. Zudem kann über den Boxplot die Verteilung der Werkzeuglebenszykluskosten innerhalb einer Komponente bzw. Phase für einen Werkzeugtyp eingesehen und als Entscheidungsgrundlage genutzt werden. Die Filtermöglichkeiten sind identisch zu den Filtern der zuvor vorgestellten Kennzahl. Für diese Kennzahl werden zusätzlich zu den generellen Voraussetzungen Daten über die einzelnen Komponenten der Werkzeuglebenszykluskosten benötigt. Zusammenfassend steht in der ersten Analyse-

⁶⁶⁶ Eigene Darstellung

stufe die Identifikation jener Werkzeugtypen im Fokus, welche signifikante Standmengenabweichungen und erhöhte Werkzeuglebenszykluskosten aufweisen. Es soll zudem ein tiefgreifendes Verständnis für die Zusammensetzung der Werkzeuglebenszykluskosten aus den individuellen Komponenten bzw. Phasen generiert werden. Darüber hinaus können verschiedene Filter genutzt werden, um den Einfluss der verschiedenen Parameter eingrenzen und bewerten zu können. Basierend auf den in der ersten Stufe identifizierten Werkzeugtypen werden in der zweiten Analysestufe die Standmengenabweichungen und die Werkzeuglebenszykluskosten der einzelnen Instanzen des zuvor ausgewählten Werkzeugtyps in einem Balkendiagramm dargestellt. Dadurch wird visualisiert, ob es bezogen auf die einzelnen Instanzen Ausreißer bei den Standmengenabweichungen bzw. den Werkzeuglebenszykluskosten gibt. Essentiell für diese Analyse sind Daten zu den Ist- und Sollstandmengen der Werkzeuginstanzen sowie Informationen, die deren Werkzeuglebenszykluskosten betreffen. Ergänzend können hier, analog zur ersten Analysestufe, Filterkriterien wie Zeitraum, Anlage, Produkt, Stahlorte und nunmehr auch der spezifische Werkzeugtyp angewendet werden.

Die zweite Analysestufe zielt darauf ab, basierend auf den Ergebnissen der ersten Analysestufe und den dort identifizierten Werkzeugtypen, nun die einzelnen Instanzen dieser genauer zu analysieren. Hierbei geht es vor allem um die Identifikation und Analyse der Ausreißer und Anomalien, die zu hohen Standmengenabweichungen oder hohen Werkzeuglebenszykluskosten führen. Auf der finalen dritten Analysestufe der Werkzeugebene werden die Ausfallgründe der auf Stufe 1 identifizierten Werkzeugtypen in einem Kreisdiagramm aufgezeigt. Somit kann analysiert werden, ob bestimmte Ausfallgründe in erhöhtem Maße auftreten und welche der Gründe in der Feinanalyse noch einmal näher betrachtet werden sollten. Neben den bereits bekannten Filterkriterien kann hier auch nach dem Alter sowie dem Status des Werkzeugs bzw. der Werkzeugkomponente gefiltert werden, um Korrelationen zwischen dem Lebenszyklus des Werkzeugs und spezifischen Ausfallursachen zu identifizieren. Ziel dieser Phase ist es, basierend auf den Resultaten der beiden vorangegangenen Stufen, die vielfältigen Gründe für Werkzeugausfälle differenziert zu betrachten und eine solide Grundlage für die nachfolgende Feinanalyse zu schaffen.

In der summarischen Übersicht der Top 3 werden die höchsten und geringsten Werte bezogen auf die Werkzeugtypen hinsichtlich der Standmengenabweichungen und absoluten Werkzeuglebenszykluskosten präsentiert. Das übergeordnete Ziel der Werkzeugebene besteht darin, eine schrittweise Exploration der Werkzeuge vorzunehmen, beginnend bei der Typologie bis hin zu spezifizierten Ausfallursachen. Es soll für den Anwendenden mit wenig Aufwand ersichtlich sein, welche Werkzeugtypen hohe Werkzeuglebenszykluskosten verursachen und wie stabil die prognostizierten Sollstandmengen erreicht werden. Im zweiten Schritt kann für einen identifizierten Werkzeugtypen die Analyse auf die einzelnen zugehörigen Instanzen vertieft werden, um auf einen Blick Ausreißer und Trends in Bezug auf die Standmengenabweichungen, die Werkzeuglebenszykluskosten sowie die Ausfallgründe zu identifizieren. Hierdurch wird ein Ausgangspunkt für die Feinanalyse geschaffen, welche Werkzeuge priorisiert betrachtet und welche Ausfallgründe technisch analysiert werden sollten. In der nachfolgenden Abbildung 128 sind die Kennzahlen der Werkzeugebene dargestellt.

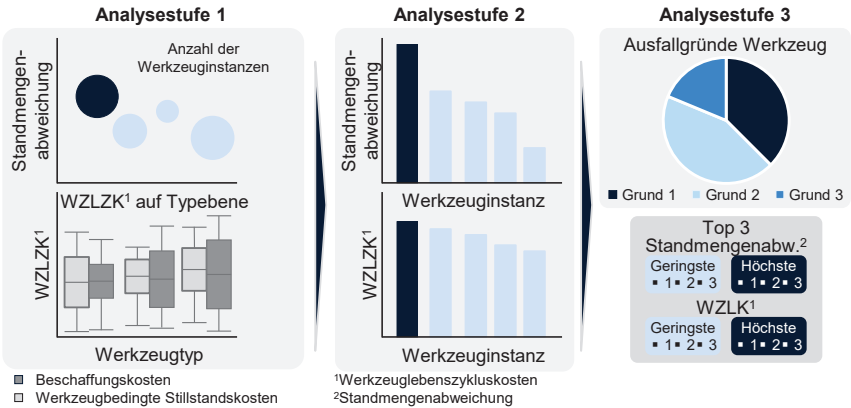


Abbildung 128: Kennzahlen der Werkzeugebene⁶⁶⁷

Produktebene

Die Analyse auf der Produktebene ist in zwei Stufen strukturiert. Die erste Stufe visualisiert die Werkzeugkosten je produziertem Teil bezogen auf die unterschiedlichen produzierten Produkte bzw. Produktkategorien, während in der zweiten Stufe die Produktvarianten einer Produktkategorie, die in der ersten Stufe identifiziert worden ist, näher betrachtet und die Werkzeugkosten je produziertem Teil nach den verschiedenen Produktvarianten sowie den für die Produktion verwendeten Anlagen differenziert werden.

Für die Umsetzung der ersten Analysestufe werden Informationen über die Produkte und deren Werkzeugkosten benötigt. Eine der zentralen Kennzahlen in dieser Phase stellen die Werkzeugkosten je produziertem Teil dar, welche mittels eines Scatterplots visualisiert werden. Die Größe der dargestellten Kreise reflektiert dabei die Menge der produzierten Teile des jeweiligen Produkttyps. Auf der x-Achse sind alphabetisch die verschiedenen Produkttypen aufgelistet. Auf diese Weise können mit geringem Aufwand die Produkte bzw. Produkttypen mit den höchsten Werkzeugkosten je produziertem Teil identifiziert werden. Die Filter ermöglichen es, beispielsweise nach Zeitraum, Anlage, Produktionsbereich, Werkzeugtyp und Material zu differenzieren. Mit der gezielten Wahl der Filter kann identifiziert werden, ob Veränderungen bei den Werkzeugkosten je hergestelltem Teil über einen spezifischen Zeitraum stattgefunden haben bzw. auf die Produktionsanlage, das verwendete Werkzeug oder das eingesetzte Material zurückgeführt werden können. Die zweite Kennzahl in dieser Stufe ist vergleichbar zur ersten, allerdings wird hier ein Violin Plot zur Visualisierung eingesetzt. Dieser kombiniert Boxplots mit Dichtekurven der Datenpunkteverteilung. Ein charakteristisches Merkmal des Violin Plots ist die Symmetrie entlang der vertikalen Achse, wodurch auf den gegenüberliegenden Seiten unterschiedliche Filter angewendet werden können, um die Ausprägungen direkt miteinander vergleichen zu können.⁶⁶⁸ Die restlichen Filtermöglichkeiten

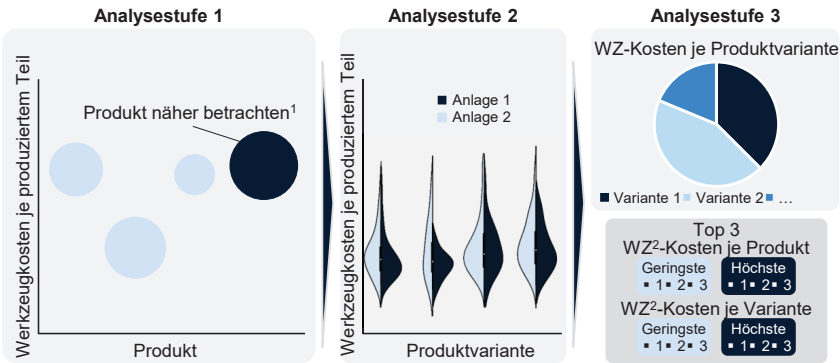
⁶⁶⁷ Eigene Darstellung

⁶⁶⁸ Vgl. Hintze; Nelson (Violin Plots: A Box Plot-Density Trace Synergism), 1998, S. 181-182.

sind analog zu denen der ersten Kennzahl. Das primäre Ziel der ersten Analysestufe ist die Identifikation von Produkten bzw. Produkttypen mit den höchsten Werkzeugkosten, sowohl absolut als auch pro produziertem Teil.

In der zweiten Analysestufe stehen die Werkzeugkosten je produziertem Teil für unterschiedliche Produktvarianten des zuvor ausgewählten Produkts sowie unter Berücksichtigung der verschiedenen für die Produktion genutzten Anlagen im Vordergrund. Für die Visualisierung dieser Kennzahl sind Informationen über die Produktvarianten der ausgewählten Produkte, die dazugehörigen Werkzeugkosten sowie die zur Produktion verwendeten Anlagen notwendig. Produkte bzw. Produkttypen, die in der ersten Stufe als kritisch identifiziert worden sind, werden weiter analysiert und die Werkzeugkosten für die unterschiedlichen Produktvarianten dieses Produkts bzw. Produkttyps in einem Kreisdiagramm präsentiert. Hierbei wird aufgezeigt, welche spezifischen Produktvarianten primär für die Werkzeugkosten verantwortlich sind. Ziel ist es zu verstehen, ob und inwiefern sich die Werkzeugkosten je produziertem Teil für unterschiedliche Produktvarianten und bezogen auf eine Variante für unterschiedlich eingesetzte Anlagen unterscheiden.

Zusätzlich wird wie auch auf den anderen Ebenen ein Überblick über die drei höchsten und geringsten Werkzeugkosten je Produkt bzw. je Produktvariante bereitgestellt. Das übergeordnete Ziel der Produktebene ist die Identifikation der Produkte bzw. Produktvarianten mit den höchsten absoluten bzw. höchsten Werkzeugkosten je produziertem Teil sowie die Bestimmung der dafür verantwortlichen Werkzeuge. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die nachfolgende Feinanalyse, in der diese Aspekte vertieft betrachtet werden. In der nachfolgenden Abbildung 129 sind die Kennzahlen der Produktebene dargestellt.



¹Größe der Kreise = Produzierte Endprodukte ²Werkzeug

Abbildung 129: Kennzahlen der Produktebene⁶⁶⁹

⁶⁶⁹ Eigene Darstellung

5.2.3 Datenbasierte Use Cases

Für eine umfassende Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten sowie die ganzheitliche Optimierung des Werkzeugeinsatzes ist aufbauend auf den zuvor erfassten und analysierten Werkzeuglebenszykluskosten und -daten die Umsetzung von werkzeuglebenszyklusdatenbasierten Use Cases erfolgsversprechend. Wie bereits in Kapitel 5.2.2 erläutert, dient die Bauteilspezifische Analyse insbesondere dazu, die Werkzeugtypen mit hohem Kosteneinsparpotenzial zu identifizieren und im zweiten aufbauenden Schritt die ursächlichen Ursache-Wirkungszusammenhänge zu eruieren. Die Realisierung der Kosteneinsparung bzw. der optimierten Werkzeugnutzung wird im Aktivitätselement Datenbasierte Use Cases erläutert. Dazu erfolgt zunächst die Identifikation von Use Cases, die auf den Daten der Digitalen Werkzeugakte basieren. Im nachfolgenden Schritt erfolgt die systematische Konzeption und Ausdetaillierung der Use Cases und ggf. eine prototypische Umsetzung. Darauf aufbauend folgt die qualitative und quantitative Bewertung der Use Cases nach Nutzen und Aufwand. Abschließend erfolgt die Priorisierung der Use Cases und Ableitung einer Implementierungs-Roadmap. Die Gestaltungsaspekte des Gestaltungselements Datenbasierte Use Cases sind in Abbildung 130 dargestellt.

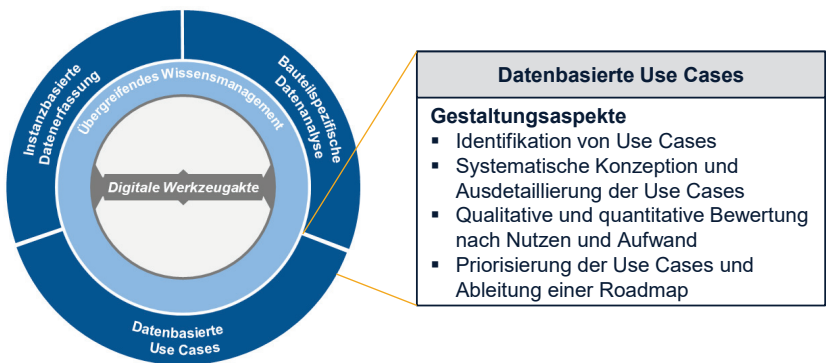


Abbildung 130: Aspekte des Gestaltungselements Datenbasierte Use Cases⁶⁷⁰

Die nachfolgend vorgestellten Inhalte basieren auf mehreren durch den Autor durchgeführten oder begleiteten Konsortial- und Industrieprojekten zu den Themen Identifikation und Konzeption von datenbasierten Use Cases im Kontext der Werkzeuglebenszykluskostenanalyse, digitale Erfassung und Auswertung von Werkzeugstandmengen, effiziente Werkzeuginstandhaltung während der Serienproduktion sowie Konzeption und Umsetzung einer digitalen Werkzeugakte. In Zusammenarbeit mit zahlreichen und namhaften Vertretern des Werkzeugbaus, der Serienproduktion sowie der Werkzeuginstandhaltung sind datenbasierte Use Cases im

⁶⁷⁰ Eigene Darstellung

Kontext der Werkzeuglebenszykluskostenanalyse diskutiert und Kriterien für die Gestaltung und Bewertung erarbeitet worden.

5.2.3.1 Grundlagen

Ein erster Schritt zur Erstellung eines Modells für ein System ist die Anforderungsermittlung, bei dem der Entwickelnde zusammen mit dem Kunden zunächst den Zweck des Systems definiert. Das Ergebnis ist eine Beschreibung des Systems durch Akteure und Use Cases. Akteure sind externe Einheiten, die mit dem System in Interaktion treten. Use Cases bilden alle möglichen Aktionen zwischen einem Akteur und dem System ab und stellen eine allgemeine Abfolge von Ereignissen dar.⁶⁷¹ Aufbauend auf der ersten Erwähnung und kurzen Erläuterung der User Story in Kapitel 5.1.1 werden im Folgenden der Begriff Use Cases definiert, das Use Case Diagramm erklärt und das Vorgehen zur Identifikation von Use Cases erläutert. Die drei genannten Aspekte stellen insbesondere für den ersten Teil dieses Kapitels die methodische Grundlage dar.

Der Begriff Use Case stammt aus dem Software-Engineering und wird in ISO/IEC 1905-2 wie folgt definiert. Ein Use Case ist ein Mittel zur Spezifizierung der erforderlichen Verwendungen eines Systems und zur Erfassung von Anforderungen an das System. Es führt zu einem beobachtbaren Ergebnis, das in der Regel für einen oder mehrere Akteure oder andere Stakeholder des Systems von Wert ist.⁶⁷² Use Cases sind erste Bausteine für Projekte im Software-Engineering und beschreiben ein entwickeltes System und seine Funktionalitäten in statischer und dynamischer Hinsicht. Die Akteure bilden die statische Sicht, während die dynamische Sicht durch die Beziehung zwischen Akteuren und dem System abgebildet werden. Innerhalb eines Anwendungsfalles müssen also die Akteure, aber auch ihre Ziele und die Vorgehensweise zur Erreichung der Ziele, identifiziert werden. Die unterschiedlichen Ergebnisse von Vorgehensweisen in Abhängigkeit von verschiedenen Bedingungen werden in Szenarien mit einer bestimmten Schrittfolge erfasst. Use Cases werden in der Regel auf Basis eines abstrakten Geschäftsfalls ohne technische Details erstellt und in einer sogenannten User Story schriftlich erläutert. Aufbauend darauf werden Experten konsultiert und Informationen gesammelt, um den Use Case ausführlicher zu beschreiben. Zu der Beschreibung des Use Cases gehört unter anderem eine Kurzbeschreibung und eine vollständige Beschreibung. Die Kurzbeschreibung gibt einen kurzen Überblick über den Use Case und sollte nicht länger als zehn Zeilen lang sein. Die vollständige Beschreibung erläutert ausführlich wie, wo, wann, wieso und unter welchen Annahmen der Use Case stattfindet und sollte auch von Nicht-Experten verstanden werden. Um die Funktion der Use Cases zu beschreiben, werden diese mit Hilfe von Use Case Diagrammen abgebildet. Es können beispielsweise Aktivitätsdiagramme, Sequenzdiagramme oder Diagramme mit UML-Notation genutzt werden.⁶⁷³ Use Case Diagramme beinhalten neben den Use Cases auch die Akteure und das gesamte System. Während die Use Cases als Ellipse innerhalb des Rechteckes der Systemgrenze dargestellt werden, befinden sich die Akteure außerhalb der Grenze. Akteure können sowohl Personen als auch externe Hardware

⁶⁷¹ Vgl. Brügge et al. (Object-oriented software engineering), 2000, S. 14.

⁶⁷² Vgl. ISO/IEC JTC 1 Information technology, (ISO/IEC 19505-2), 2012, S. 603-614.

⁶⁷³ Vgl. Gottschalk et al. (The Use Case and Smart Grid Architecture Model Approach), 2017, S. 11-19.

oder andere Subjekte repräsentieren. Wichtig ist, dass sowohl die Use Cases als auch die Akteure mit einem Namen eindeutig benannt werden.⁶⁷⁴ Ein beispielhaftes Use Case Diagramm ist in Abbildung 131 dargestellt, das den Vorgang Geld an einem Geldautomaten abheben abbildet.

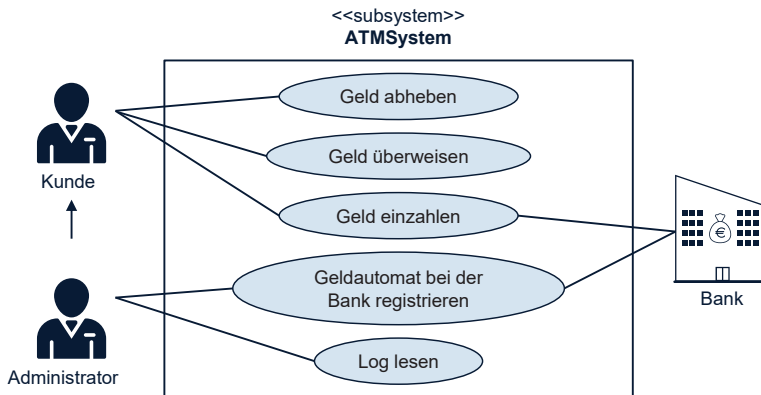


Abbildung 131: Beispiel Use Case Diagramm⁶⁷⁵

In diesem Beispiel bildet ein Bankautomat (engl. Automated Teller Machine, ATM) das System und die Systemgrenzen. Der Kunde, der Administrator und die Bank sind jeweilige Akteure und Use Cases sind unter anderem Geld abheben oder den Geldautomaten bei der Bank registrieren. Welcher Akteur in welchem Use Case involviert ist, wird durch die Linie dargestellt. In manchen Fällen kommt es vor, dass Abläufe bei Use Cases identisch sind. Um sicherzustellen, dass keine Redundanzen innerhalb der Use Cases entstehen, wird für die Gemeinsamkeit ein eigener Use Case aufgenommen. Im Use Case Diagramm werden diese dann über eine <<include>>-Beziehung verbunden. Außerdem kann es vorkommen, dass ein Spezialfall eines Use Cases dargestellt werden soll. Um auch hier eine Redundanz zu vermeiden, wird die <<extend>>-Beziehung genutzt.⁶⁷⁶ Beide Fälle sind als Beispiel in Abbildung 132 abgebildet.

⁶⁷⁴ Vgl. ISO/IEC JTC 1 Information technology, (ISO/IEC 19505-2), 2012, S. 603-616.

⁶⁷⁵ Vgl. ISO/IEC JTC 1 Information technology, (ISO/IEC 19505-2), 2012, S. 614.

⁶⁷⁶ Vgl. Kleuker (Grundkurs Software-Engineering mit UML), 2018, S. 68-69.

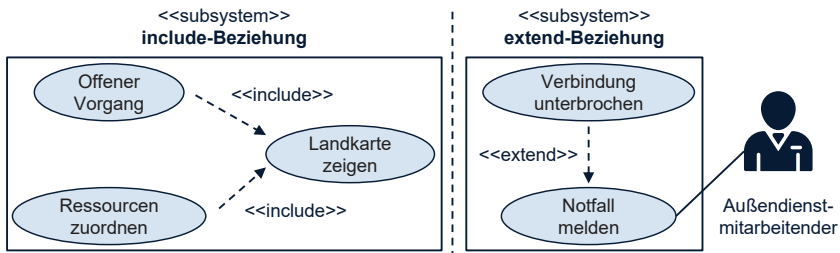


Abbildung 132: Beziehungen zwischen Use Cases⁶⁷⁷

Zur Identifikation von Use Cases werden mit ausgewählten Repräsentanten der Stakeholder die Kernfunktionalitäten des Systems identifiziert. Als Stakeholder sind alle Personen gemeint, die Anforderungen an das System formulieren, z.B. die späteren Nutzer.⁶⁷⁸ Dazu werden zunächst die Akteure identifiziert, die mit dem System interagieren, sodass die Grenzen des Systems festgelegt werden können und alle Perspektiven bei der Betrachtung des Systems berücksichtigt werden. Anschließend werden mögliche Szenarien ermittelt, die eine informelle Beschreibung von Teilfunktionen des Systems aus Sicht eines einzelnen Akteurs darstellen. Die Szenarien werden dann von Entwicklern als Use Cases formalisiert. Abschließend werden die Beziehungen zwischen den Akteuren und den Use Cases abgebildet, sodass die Komplexität des Systems reduziert und die Verständlichkeit erhöht werden kann.⁶⁷⁹

5.2.3.2 Identifikation von Use Cases

Die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse erfolgt wie in Kapitel 5.1.1 erläutert mit den Zielsetzungen, die Werkzeugzuverlässigkeit zu steigern und die Werkzeuglebenszykluskosten absolut sowie pro produziertem Endprodukt zu senken. Aufbauend auf den zuvor erläuterten Gestaltungselementen soll die Realisierung der identifizierten Kosteneinsparungen bzw. der optimierten Werkzeugnutzungen mithilfe von Use Cases erreicht werden. Diese basieren auf gesammelten Daten und Kosten entlang des Werkzeuglebenszyklus. Die Identifikation der datenbasierten Use Cases folgt einem dreischrittigen Vorgehen. Zunächst werden auf Basis der zuvor bereits durchgeführten Schritte Potenziale identifiziert, die im zweiten Schritt strukturiert werden. Abschließend werden aus den strukturierten Potenzialen Use Cases abgeleitet. Der Prozess zur Identifikation von datenbasierten Use Cases ist in der nachfolgenden Abbildung 133 dargestellt.

⁶⁷⁷ Vgl. Brügge et al. (Object-oriented software engineering), 2000, S. 114-115.

⁶⁷⁸ Vgl. Kleuker (Grundkurs Software-Engineering mit UML), 2018, S. 56.

⁶⁷⁹ Vgl. Brügge et al. (Object-oriented software engineering), 2000, S. 106-113.



Abbildung 133: Vorgehen zur Identifikation von Use Cases⁶⁸⁰

Identifizierung von Potenzialen

Für die Identifizierung von mehreren Ideen in hoher Qualität sollten möglichst viele der beteiligten Stakeholder des Werkzeugbaus sowie der Serienproduktion auf allen Ebenen berücksichtigt werden. Für eine effiziente und zielgerichtete Identifikation von Use Cases ist es zudem erfolgsversprechend, wenn die zu befragenden Stakeholder bereits aktiv bei der Entwicklung der Digitalen Werkzeugakte, der instanzbasierten Datenerfassung sowie der bauteilspezifischen Datenanalyse mitgewirkt haben und bereits erste Ergebnisse aus diesen Schritten vorliegen haben. Im Idealfall können aufbauend auf der initial entwickelten Zielsetzung sowie den ersten Ergebnissen der bauteilspezifischen Datenanalyse erste Potenzialfelder abgeleitet werden. Eine Herausforderung dabei ist jedoch einerseits die große Vielfalt möglicher Potenziale bzw. Use Cases, andererseits mangelndes Bewusstsein für potenzielle Anwendungen aufbauend auf den Daten der Werkzeuglebenszykluskostenanalyse bei den Mitarbeitenden eines Unternehmens. Demnach ist es wichtig, die Mitarbeitenden zu unterstützen und über konkrete Ziele und Anwendungsmöglichkeiten zu informieren, um eine Vielzahl guter Ideen generieren zu können. Für die Identifikation von Potenzialen entlang der Prozesskette sowie der darauf aufbauenden Use Case Ableitung wird ein zweigleisiges Vorgehen empfohlen. Zum einen werden die Mitarbeitenden des Werkzeugbaus oder der Serienproduktion, die täglich in direktem Kontakt mit den Werkzeugen und Softwaresystemen stehen und ein tiefgreifendes Verständnis für ihre Bereiche und Prozesse aufbringen, interviewt. Zum anderen werden Use Cases durch das Management erarbeitet, um strategisch wichtige Themen für das Unternehmen zu berücksichtigen und gleichzeitig ein übergeordnetes Verständnis mit einzubringen. Für die Identifizierung von Potenzialen ist es empfehlenswert, sich am Werkzeuglebenszyklus und den dazugehörigen Haupttätigkeiten zu orientieren. In der nachfolgenden Abbildung 134 ist der Werkzeuglebenszyklus abweichend von der sonst verwendeten Nomenklatur inkl. den vier Phasen Entwicklung, Fertigung & Anlauf, Nutzung sowie Ende erster Lebenszyklus und den

⁶⁸⁰ Eigene Darstellung

dazugehörigen Haupttätigkeiten abgebildet. An dieser Stelle wird eine abweichende Nomenklatur gewählt, um die einzelnen Lebenszyklusphasen des Werkzeugs insbesondere unter dem Aspekt der Potenzialerkennung besser voneinander abzugrenzen zu können.

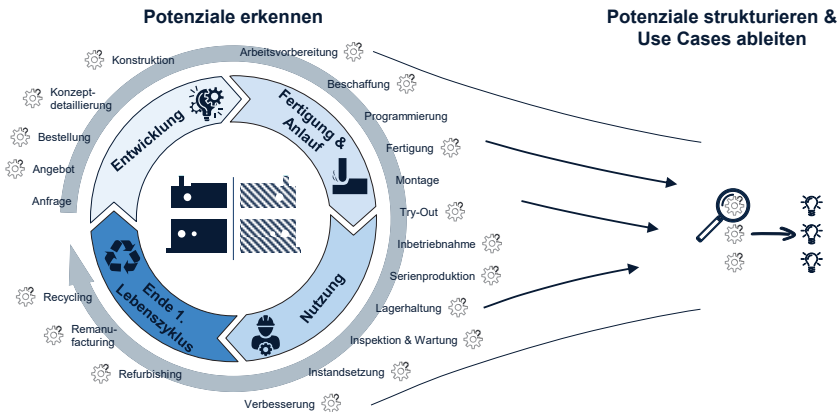


Abbildung 134: Haupttätigkeiten entlang des Werkzeuglebenszyklus⁶⁸¹

Für die Identifikation von Potenzialen entlang des Werkzeuglebenszyklus eignen sich zudem die nachfolgend dargestellten Leitfragen:

- Welche zusätzliche Zielsetzung sollte auf Basis bisher gewonnener Projekterkenntnisse mit der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse adressiert werden?
- Welche zusätzlichen Daten sollten dazu erhoben werden?
- Wie kann der Erfassungsprozess entlang des Werkzeuglebenszyklus vereinfacht und weiter abgesichert werden?
- Welche Potenziale können auf Basis der bauteilspezifischen Datenanalyse realisiert werden?
- Wie können die über den Werkzeuglebenszyklus gesammelten Daten dazu eingesetzt werden, den Werkzeugeinsatz zu verbessern?
- Wie können die erfassten Werkzeuglebenszykluskosten dazu eingesetzt werden, die Werkzeugkosten absolut sowie je produziertem Endprodukt zu reduzieren?
- Wodurch kann zusätzlicher, datenbasierter Nutzen für die unterschiedlichen Stakeholder entlang des Werkzeuglebenszyklus generiert werden?
- Welches Kosteneinsparpotenzial kann auf Basis der gesammelten Werkzeuglebenszyklusdaten bzw. -kosten realisiert werden?
- Wie kann das Kosteneinsparpotenzial realisiert werden?

In der nachfolgenden Abbildung 135 sind beispielhaft 2 Potenziale, inklusive einer Kurzbeschreibung, entlang des Werkzeuglebenszyklus dargestellt.

⁶⁸¹ Eigene Darstellung

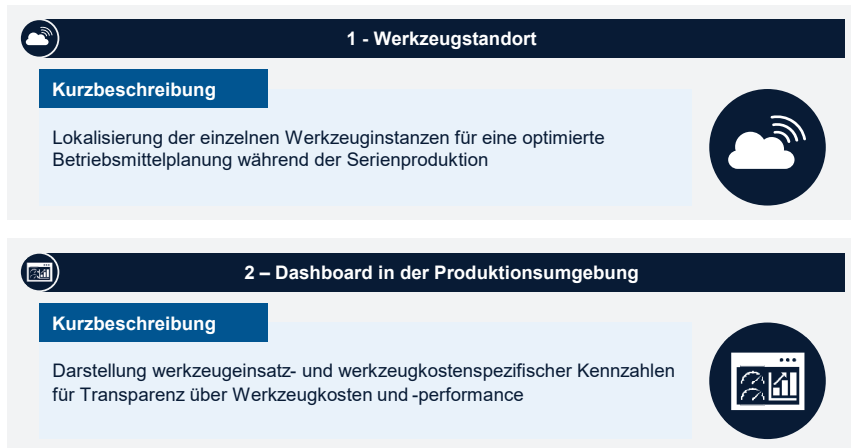


Abbildung 135: Potenzial 1 und 2 inkl. Kurzbeschreibung⁶⁸²

Weitere Potenziale inklusive Kurzbeschreibung sind im Anhang abgedruckt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass das volle Potenzial der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse langfristig gesehen auch durch einzelne Potenziale in der Phase Ende erster Lebenszyklus ausgeschöpft werden kann. In diesem Zusammenhang bieten sich im Kontext der nutzen- und wertsteigernden Kreislaufwirtschaft vielfältige Betätigungsmöglichkeiten. Beispielsweise kann auf Basis weiterer zu erfassender und auszuwertender Daten der Zustand einer Werkzeugkomponente in Echtzeit bewertet werden. Daraufhin kann über die weitere Verwendung der Werkzeugkomponente im gleichen oder einem anderen Werkzeug in Form einer Weiternutzung, einer Wartung, einer Instandhaltung oder eines Upgrades zum Beispiel durch das Auftragen einer hochwertigeren Beschichtung entschieden werden.

Strukturierung der Potenziale

Im zweiten Schritt werden die identifizierten Potenziale strukturiert und eine erste Vorauswahl vorgenommen. Dazu wird überprüft, inwiefern die identifizierten Potenziale mit den übergeordneten Zielsetzungen sowie den unternehmensindividuellen Zielsetzungen der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse übereinstimmen. Wie in Kapitel 5.1.2 erläutert, wird bei den übergeordneten Zielsetzungen der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse zwischen der Werkzeugeinsatz- und der Werkzeugkostenperspektive unterschieden. Zusätzlich können die Potenziale anhand des Kriteriums der Kritikalität bewertet werden. Dazu werden die Potenziale als notwendig oder optional klassifiziert. In der nachfolgenden Abbildung 136 sind die beiden Perspektiven sowie die Einordnung der Kritikalität abgebildet.

⁶⁸² Eigene Darstellung



Abbildung 136: Perspektiven auf die datenbasierten Use Cases⁶⁸³

Für den Fall, dass nur eine geringe oder keine Übereinstimmung zwischen dem identifizierten Potenzial und den definierten Zielsetzungen besteht sowie die Kritikalität als nicht notwendig bewertet wird, kann das Potenzial für eine mögliche spätere Verwendung ins Backlog aufgenommen werden, wird jedoch zunächst nicht weiterverfolgt. Die restlichen Potenziale werden in befähigende und nutzenstiftende Potenziale unterschieden. Befähigende Potenziale zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht direkt nutzenstiftend sind, sondern die Voraussetzung schaffen, dass ein oder mehrere Potenziale darauf aufbauend einen Nutzen stiften können.

Dazu werden die Potenziale in Anlehnung an den Industrie 4.0 Maturity Index in die vier Kategorien Aufnahme, Visualisierung, Analyse und Vorhersage unterteilt.⁶⁸⁴ In die Kategorie Aufnahme fallen Potenziale, die den Prozess der Datenaufnahme vereinfachen oder gegenüber fehlerhaften bzw. vergessenen Eingaben absichern. Die Kategorie Visualisierung steht für Potenziale, die auf die Visualisierung von Kennzahlen und Trends sowie auf die Erhöhung der Transparenz im Anwendungszusammenhang abzielen. In die Kategorie Analyse können Potenziale eingeordnet werden, die basierend auf der Analyse von Vergangenheitsdaten zu Kosteneinsparpotenzialen oder zu Verbesserungen des Werkzeugeinsatzes führen können. Abschließend können in die Kategorie Vorhersage Potenziale eingeordnet werden, die darauf abzielen, durch die Vorhersage von Zusammenhängen im Anwendungszusammenhang einen Nutzen zu erzielen. In der nachfolgenden Abbildung 137 sind die vier genannten Kategorien zur Klassifizierung der Potenziale dargestellt.



Abbildung 137: Kategorisierung der datenbasierten Use Cases⁶⁸⁵

Ableitung von Use Cases

Abschließend werden die identifizierten und klassifizierten Potenziale zu Use Cases detailliert. Dazu wird zu jedem Potenzial ein Use Case Steckbrief erstellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Use Case Steckbriefe empfiehlt es sich, zunächst einen Standard für den Use Case

⁶⁸³ Eigene Darstellung

⁶⁸⁴ I.A.a. Schuh et al. (Industrie 4.0 Maturity Index), 2017, S. 16.

⁶⁸⁵ Eigene Darstellung

Steckbrief zu entwickeln. Grundsätzlich sind die Informationen auf dem Steckbrief unternehmensindividuell zu definieren. Im Anwendungszusammenhang wird empfohlen, dem Use Case zunächst eine Bezeichnung zu geben, anschließend sollten die beteiligten Stakeholder, eine Kurzbeschreibung sowie das zugrundeliegende Potenzial folgen. Darüber hinaus sollten die adressierte übergeordnete Zielsetzung, in diesem Fall Perspektive genannt, die adressierten unternehmensindividuellen Teilzielsetzungen aufgeführt sowie die Kategorie und Kritikalität des Use Cases genannt werden. In der nachfolgenden Abbildung 138 ist beispielhaft ein Use Case Steckbriefe dargestellt. In Abbildung 187 im Anhang ist ein weiter Use Case Steckbrief abgebildet. Im nächsten Unterkapitel wird auf die systematische Konzeption und Ausdetaillierung der Use Cases eingegangen.



1 - Werkzeugstandort

Kurzbeschreibung

Lokalisierung der einzelnen Werkzeuginstanzen für eine optimierte Betriebsmittelplanung während der Serienproduktion



Potenziale

- Rückverfolgbarkeit der Werkzeugkomponenten
- Ständige Lokalisierung der Werkzeuginstanzen

Zielsetzung

- ✓ Transparenz über den Werkzeugeinsatz
- ✓ Optimierung des Werkzeugeinsatzes

Stakeholder

- Produktion
- Instandhaltung
- Werkzeugbau

Perspektive

Werkzeugkosten

Werkzeugeinsatz

Kategorie

Vorhersage

Analyse

Visualisierung

Aufnahme

Basics

Kritikalität

notwendig

optional

Abbildung 138: Use Case 1 - Werkzeugstandort⁶⁸⁶

5.2.3.3 Systematische Konzeption und Ausdetaillierung der Use Cases

Die systematische Konzeption und Ausdetaillierung der Use Cases dient dazu, gemeinsam ein einheitliches und tiefgreifendes Verständnis für jeden einzelnen Use Case zu erarbeiten, um anschließend eine qualitative und quantitative Bewertung nach Nutzen und Aufwand durchführen zu können. Dazu wird eine zweischrittige Einsatzanalyse für jeden Use Case durchgeführt. Der erste Teilschritt ist die Bewertung des Status quo. Der zweite Schritt ist die

⁶⁸⁶ Eigene Darstellung

Ableitung möglicher Zielzustände. In der nachfolgenden Abbildung 139 ist das zweischrittige Vorgehen dargestellt. Die beiden Schritte werden nachfolgend detailliert erläutert.

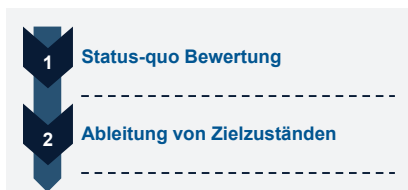


Abbildung 139: Systematische Konzeption und Ausdetaillierung der Use Cases⁶⁸⁷

Status-quo Bewertung

Die Status-quo Bewertung wird anhand von zehn Kriterien durchgeführt. Im Detail wird identifiziert, ob und ggf. in welchem Umfang das dem Use Case zu Grunde liegende Potenzial im Anwendungszusammenhang bereits im Unternehmen adressiert wird, ob alle zur Umsetzung des Potenzials benötigten Datenquellen bereits in die Datenstruktur der digitalen Werkzeugakte integriert sind, ob alle notwendigen Daten bereits erfasst sind, ob die Daten aus unterschiedlichen Quellen bereits verknüpft und visualisiert sind, ob die Daten bereits analysiert und ausgewertet sind, ob die Daten bereits prognostiziert sind und ob kritische Abhängigkeiten zu bereits adressierten oder neu identifizierten Potenzialen bestehen. In der nachfolgenden Tabelle 8 sind die zehn Kriterien zur Bewertung des Status-quo dargestellt.

⁶⁸⁷ Eigene Darstellung

	Nicht erfüllt	Geringfügig erfüllt	Teilweise erfüllt	Überwiegend erfüllt	Vollständig erfüllt
Use Case bereits umgesetzt	☐	☐	☐	☐	☐
Datenquellen integriert	☐	☐	☐	☐	☐
Daten erfasst	☐	☐	☐	☐	☐
Daten verknüpft	☐	☐	☐	☐	☐
Daten visualisiert	☐	☐	☐	☐	☐
Daten analysiert	☐	☐	☐	☐	☐
Daten ausgewertet	☐	☐	☐	☐	☐
Daten prognostiziert	☐	☐	☐	☐	☐
Kritische Abhängigkeiten identifiziert	☐	☐	☐	☐	☐
Kosten-/Nutzenpotenzial ausgeschöpft	☐	☐	☐	☐	☐

Tabelle 8: Kriterien zur Status quo Bewertung⁶⁸⁸

Die durchgeführte Status-Bewertung wird im zweiten Schritt in Abhängigkeit von der Use Case Kategorie weiter detailliert, um die möglichen Zielzustände präziser voneinander abgrenzen zu können. Für die Kategorie Aufnahme können beispielhaft die folgenden Kriterien herangezogen werden: Sind alle notwendigen Datenquellen bereits in die Digitale Werkzeugakte integriert, wird Datenpunkt 1 aus Quelle 1 automatisiert erfasst, ist bei der Erfassung von Datenpunkt 1 aus Quelle 1 eine hohe Aktualität bzw. hohe Zuverlässigkeit garantiert. Die genannten Beispiele für die Status-quo Bewertung innerhalb der Kategorie Aufnahme sind in Tabelle 9 dargestellt.

⁶⁸⁸ Eigene Darstellung

	Nicht erfüllt	Geringfügig erfüllt	Teilweise erfüllt	Überwiegend erfüllt	Vollständig erfüllt
Datenquelle 2 integriert	☐	☐	☐	☐	☐
Datenpunkt 1 aus Quelle 1 automatisiert erfasst	☐	☐	☐	☐	☐
Hohe Aktualität für die Erfassung von Datenpunkt 1 aus Quelle 1	☐	☐	☐	☐	☐
Hohe Verlässlichkeit für die Erfassung von Datenpunkt 1 aus Quelle 1	☐	☐	☐	☐	☐
...	☐	☐	☐	☐	☐

Tabelle 9: Kriterien zur Status-quo Bewertung der Kategorie Aufnahme⁶⁸⁹

Für die Kategorie Visualisierung können zum Beispiel die folgenden Kriterien herangezogen werden: Sind die notwendigen Verknüpfungen zwischen den einzelnen Datenpunkten bereits realisiert, sind die zu visualisierenden Kennzahlen kategorisiert, sind alle Kennzahlen der Kategorie 1 auf einem Dashboard visualisiert, ist die Aktualität von Kennzahl 1 in Kategorie 1 gleich oder besser als der vorgegebene Zielwert, können alle relevanten Stakeholder Kennzahl 1 in Kategorie 1 für ihren Anwendungsfall nutzen. Die genannten Beispiele für die Status-quo Bewertung innerhalb der Kategorie Visualisierung sind in Tabelle 10 dargestellt.

	Nicht erfüllt	Geringfügig erfüllt	Teilweise erfüllt	Überwiegend erfüllt	Vollständig erfüllt
Datenpunkt 2 aus Quelle 1 mit Datenpunkt 1 aus Quelle 2 verknüpft	☐	☐	☐	☐	☐
Kennzahlen kategorisiert	☐	☐	☐	☐	☐
Kennzahlen der Kategorie 1 visualisiert	☐	☐	☐	☐	☐
Aktualität von Kennzahl 1 in Kategorie 1 gewährleistet	☐	☐	☐	☐	☐
Stakeholder können Kennzahl 1 in Kategorie bedarfsgerecht nutzen	☐	☐	☐	☐	☐
...	☐	☐	☐	☐	☐

Tabelle 10: Kriterien zur Status-quo Bewertung der Kategorie Visualisierung⁶⁹⁰

Für die beiden Kategorien Analyse und Visualisierung wird an dieser Stelle auf die Angabe von beispielhaften Kriterien verzichtet, da das Vorgehen durch die zwei angegebenen Beispiele bereits hinreichend vorgestellt worden ist. Sobald alle Kriterien unternehmensindividuell

⁶⁸⁹ Eigene Darstellung

⁶⁹⁰ Eigene Darstellung

definiert sind, kann die Status-quo Bewertung für jeden Use-Case erfolgen. Auf die Status-quo Bewertung folgt im nächsten Schritt die Ableitung von möglichen Zielzuständen.

Ableitung von Zielzuständen

Im zweiten Schritt werden verschiedene Zielzustände für die einzelnen Use Cases auf Basis der Status-quo Bewertung abgeleitet und die Abhängigkeiten der Use Cases untereinander untersucht. Beispielhaft ist es sehr gut möglich, dass es für einen Use Case der Kategorie Vorhersage notwendig ist, dass zuvor verschiedene Use Cases der anderen Kategorien umgesetzt worden sind. Für eine systematische Identifikation der Abhängigkeiten zwischen den Use Cases empfiehlt es sich, für jeden Use Case anfangend bei der Kategorie Vorhersage über die Kategorien Analyse, Visualisierung bis hin zur Kategorie Aufnahme die Abhängigkeiten nachzuvollziehen und zu protokollieren. Falls in der Kategorie Aufnahme Voraussetzungen bspw. an die Stammdaten bestehen, kann die Kategorie Basics hinzugefügt werden.

Beispielhaft wird das Vorgehen an dem Use Case Standzeitprognose auf Instanzebene der Kategorie Vorhersage erläutert. Für die Umsetzung des Use Cases ist der Use Case Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in der Kategorie Analyse notwendig. Dieser wiederum wird durch den Use Case Dashboard in der Kategorie Visualisierung unterstützt. Der Use Case Dashboard benötigt den Use Case Kostentransparenz in der gleichen Kategorie sowie die Use Cases Instandhaltungsumfänge, Werkzeugkosten und Werkzeugdaten der Kategorie Aufnahme. Die genannten Use Cases der Kategorie Aufnahme wiederum benötigten gepflegte und vollständige Stammdaten. In der nachfolgenden Abbildung 140 sind beispielhaft die Abhängigkeiten der zuvor vorgestellten Use Cases sowie das erläuterte Beispiel dargestellt.

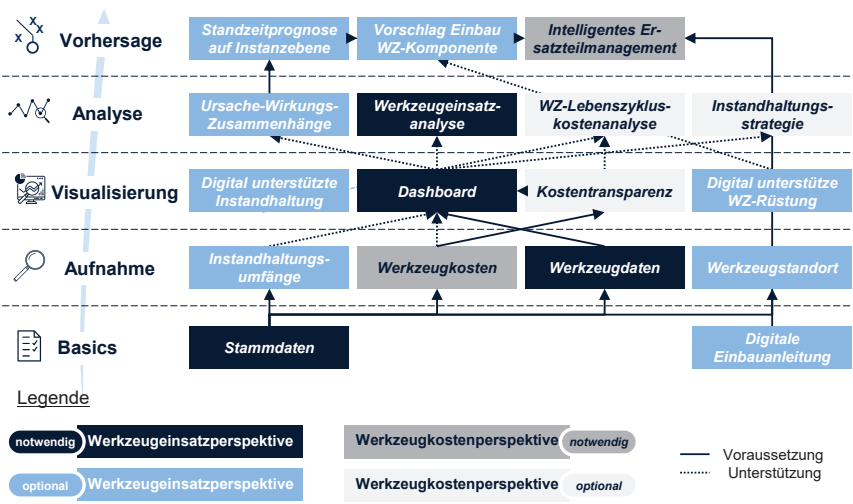


Abbildung 140: Visualisierung der Abhängigkeiten zwischen den Use Cases⁶⁹¹

⁶⁹¹ Eigene Darstellung

Basierend auf den identifizierten Abhängigkeiten können im zweiten Schritt für jeden Use Case sowie für jedes Use Case Konstrukt, das aus mehreren voneinander abhängigen Use Cases besteht, verschiedene Zielzustände definiert werden. Dies bedeutet zum Beispiel, dass bei einem Use Case Konstrukt der erste Zielzustand lediglich die Realisierung von Use Cases der Kategorie Aufnahme vorsieht oder bei einem einzelnen Use Case die Umsetzung in verschiedenen Stufen erfolgt. Das Vorgehen wird beispielhaft am Use Case Werkzeugkosten demonstriert. Wie in Kapitel 5.1.3 sind die Hauptkostentreiber eines Werkzeugs die Herstell-, Optimierungs-, Instandhaltungs- sowie werkzeugbedingte Stillstandskosten. In Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit im Unternehmen kann es sinnvoll sein, die unterschiedlichen Kostenpositionen nach und nach über einen längeren Zeitraum zu erfassen bzw. in die Digitale Werkzeugakte zu integrieren. In der nachfolgenden Abbildung 141 sind vier mögliche Stufen in aufsteigender Reihenfolge dargestellt.



Abbildung 141: Mögliche Ausbaustufen für den Use Case Werkzeugkosten⁶⁹²

Abhängig vom Use Case kann es sinnvoll sein, jede einzelne Stufe weiter zu detaillieren. Für diesen Use Case wird dies an Stufe 1 demonstriert. Dazu werden die Herstellungs- bzw. Beschaffungskosten je nach Beschaffungsart in die einzelnen Kostenpositionen aufgeschlüsselt. In einem weiteren Schritt wäre es möglich, auch diese Kostenpositionen wiederum aufzuschlüsseln. Auf diesen Schritt wird an dieser Stelle verzichtet, da das Vorgehen durch die zwei angegebenen Beispiele bereits hinreichend vorgestellt worden ist. In der nachfolgenden Abbildung 142 ist für den Use Case Werkzeugkosten beispielhaft der erste Zielzustand weiter detailliert dargestellt.

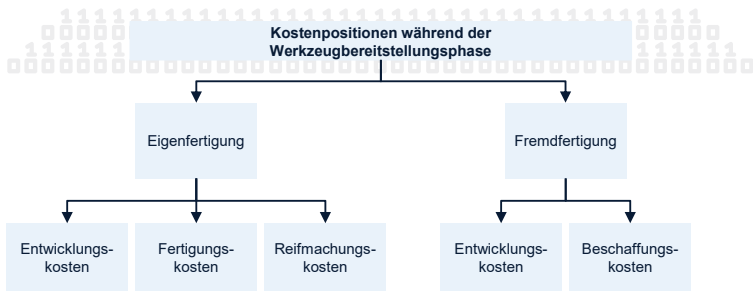


Abbildung 142: Detaillierung von Zielzustand 1 des Use Cases Werkzeugkosten⁶⁹³

⁶⁹² Eigene Darstellung
⁶⁹³ Eigene Darstellung

Aufbauend auf die systematische Konzeption und Ausdetaillierung der Use Cases folgt im nächsten Unterkapitel die qualitative und quantitative Bewertung nach Nutzen und Aufwand.

5.2.3.4 Qualitative und quantitative Bewertung nach Nutzen und Aufwand

Die Umsetzung datenbasierter Use Cases bringt nicht nur Nutzen für das Unternehmen und den Mitarbeitenden, sondern auch gleichzeitig Aufwand. Wie sehr sich die Einführung eines Use Cases für ein Unternehmen lohnt, kann durch eine Aufwand-Nutzen Bewertung untersucht werden. In der Praxis fällt es Unternehmen jedoch häufig schwer, den Nutzen und den Aufwand in Zahlen abzuschätzen. Besonders dann, wenn der Eintrittszeitpunkt in der Zukunft liegt und noch nicht eingetroffen ist. Eine ausführliche Kalkulation des Aufwands und des Nutzens für jeden Use Case ist zudem auf Grund der Anzahl der Use Cases mit hohem Aufwand verbunden. Infolgedessen wird zunächst eine relative Bewertung der Use Cases durchgeführt. Bei der Bewertung sind alle Stakeholder miteinzubeziehen. Nachfolgend wird zunächst die qualitative Nutzen- und Aufwandsbewertung und anschließend das Prinzip des Planning Poker als Bewertungsmethode vorgestellt.

Qualitative Nutzen- und Aufwandsbewertung

Für die Bewertung des Nutzwerts können verschiedene Kriterien eingesetzt werden. Grundsätzlich gilt, dass sich mit der Nutzung vieler Kriterien die Ergebnisgenauigkeit aber auch genauso der Bewertungsaufwand erhöht. Die Auswahl der Kriterien sollte entsprechend kritisch erfolgen und insbesondere Bereiche adressieren, in denen das anwendende Unternehmen ein hohes Verbesserungspotenzial besitzt. Für die Definition der Kriterien kann dazu auf die in Kapitel 5.1.2 definierte Zielsetzung sowie die untergeordneten Teilzielsetzungen für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse zurückgegriffen werden.

Darüber hinaus sollten die beiden folgenden Kriterien berücksichtigt werden. Das erste Kriterium ist die Durchführungshäufigkeit. Die Durchführungshäufigkeit beschreibt, wie häufig der Use Case innerhalb eines Betrachtungszeitraumes auftritt. Der Betrachtungszeitraum ist vom Unternehmen festzulegen. Das zweite Kriterium ist die mittelbare bzw. die unmittelbare Kosteneinsparung pro Durchführung. Es sind die Kosten zu ermitteln, die durch den Einsatz des Use Cases eingespart werden können, indem beispielsweise Zeit gespart oder Fehler vermieden werden können. Alternativ können die eingesparten Kosten auch pauschal, unabhängig von der Anzahl der Durchführungen geschätzt werden, z. B. eine Einsparung der Werkzeugkosten je produziertem Teil.

Die Kriterien können individuell vom Unternehmen angepasst oder erweitert werden. Für rein befähigende Use Cases kann für die Ermittlung des Nutzwertes die Summe der Nutzwerte der nutzenstiftenden Use Cases angenommen werden, die durch diesen Use Case befähigt werden. Damit ist sichergestellt, dass Use Cases, die viele andere Use Cases befähigen aber selber nicht direkt nutzenstiftend sind, einen entsprechend hohen Nutzwert in der Bewertung erhalten. Alternativ kann der Nutzwert der befähigenden Use Cases mithilfe eines dafür definierten Kriteriums bewertet werden.

Der Aufwand zur Einführung und Umsetzung der Use Cases setzt sich aus zwei Kriterien zusammen. Zum einen dem einmaligen Aufwand und zum anderen dem dauerhaften Aufwand. Der einmalige Aufwand beinhaltet den Implementierungs-, Change- und Schulungsaufwand. Zu dem Implementierungsaufwand zählen abhängig von der Kategorie des Use Cases die Aufnahme, Visualisierung, Analyse und Vorhersage der Informationen. Unter dem Begriff Change-Aufwand werden alle Aufwände zusammengefasst, die notwendig sind, um bei den Mitarbeitenden eine Akzeptanz bezüglich des neuen Use Cases zu erreichen und diesen in den Arbeitsalltag zu integrieren. Der Schulungsaufwand ist der Umfang an Mitarbeitenden-Schulungen, der für eine Anwendung des Use Cases im Arbeitsalltag notwendig ist.

Neben dem einmaligen Aufwand kommt als zweites Kriterium der dauerhafte Aufwand hinzu. Dazu zählt zum Beispiel der Aufwand für Eingaben ins System oder die Durchführung von notwendigen Auswertungen, die ohne den Einsatz des Use Cases nicht angefallen werden. Ein weiterer dauerhafter Aufwand ist die Wartung der für die Realisierung des Use Cases notwendigen Systeme und Softwareprodukte. Bei reiner Betrachtung des einmaligen Aufwandes würde die Amortisationszeit für die Umsetzung eines Use Cases verkürzt und damit verfälscht werden. Die Unterteilung des Aufwandes kann individuell von dem Anwenderunternehmen angepasst werden.

Für eine korrekte qualitative Nutzen- und Aufwandsbewertung ist es sinnvoll, nicht jeden einzelnen Use Case, sondern stattdessen die zuvor erläuterten Use Case Konstrukte, die aus mehreren voneinander abhängigen Use Cases bestehen, zu bewerten. Somit ist sichergestellt, dass nicht rein befähigende Use Cases mit nutzstiftenden Use Cases verglichen werden, das zu einer Verzerrung der Bewertung führen könnte. Alternativ besteht die Möglichkeit, dass einzelne Use Cases einer Kategorie miteinander verglichen werden.

Die Bewertung kann grundsätzlich in zwei Detaillierungsstufen vorgenommen werden. Zum einen kann die Aufwand-Nutzen-Bewertung der Use Cases bzw. der Use Case Konstrukte jeweils für den höchsten zu erreichenden Zielzustand ermittelt werden, zum anderen kann die Aufwand-Nutzen-Bewertung für jeden einzelnen definierten Zielzustand eines Use Cases bzw. eines Use Case Konstrukts bewertet werden. Nachfolgend wird das Prinzip des Planning Poker als Bewertungsmethode für die qualitative Aufwands- und Nutzenbewertung vorgestellt.

Qualitative Bewertungsmethode Planning Poker

Zur Bewertung der Kriterien wird das Prinzip des Planning Poker eingesetzt. Für das Planning Poker erhält jeder Stakeholder sowie das Projektteam ein Set mit Karten, das die Zahlen der Fibonacci-Folge von 1,2,3,5,8,13 und 21 enthält. Anschließend wird nach einer Schätzung der Kriterien für jeden Use Case gefragt. Die Stakeholder suchen sich eine Karte aus, die aus ihrer Sicht das Kriterium innerhalb des festgelegten Betrachtungszeitraumes am besten erfüllen. Damit eine gegenseitige Beeinflussung vermieden wird, werden die Karten zunächst verdeckt auf den Tisch gelegt. Erst bei Aufforderung werden die Karten gleichzeitig aufgedeckt. Aus den ausgewählten Karten ist der Mittelwert für jedes Kriterium zu bilden. Der Gesamtnutzwert ist am Ende durch das Addieren der Mittelwerte der einzeln bewerteten Kriterien zu errechnen.

Falls eine Gewichtung der einzelnen Nutzeilwerte sinnvoll und vom Unternehmen gewünscht ist, können die einzelnen Faktoren vor der Addition mit einem Faktor zwischen null und eins multipliziert werden. Der berechnete Nutzwert ist in dem Use Case Steckbrief zu ergänzen.⁶⁹⁴ Die Bedeutung der berechneten Werte wird durch einen Referenz Use Case festgelegt. Das bedeutet für einen beliebigen Use Case wird der Nutzen pro Kriterium ohne Abschätzung auf einen bestimmten Wert festgelegt. Die restlichen Use Cases werden anhand dieses Referenzwertes abgeschätzt. Zum Beispiel wird bei Use Case 1, der als Referenz Use Case dient, für das Kriterium Durchführungshäufigkeit der Nutzen „5“ festgelegt. Wird nun die Schätzung der restlichen Use Cases vorgenommen, können sich die Stakeholder an diesem Wert orientieren. Wird ein Use Case deutlich häufiger durchgeführt als der Referenz Use Case, sollte der Nutzen mit z.B. dem Wert „13“ oder sogar „21“ abgeschätzt werden. Bei einer geringeren Durchführungshäufigkeit als bei dem Referenz Use Case ist der Nutzen entsprechend mit einem niedrigeren Wert abzuschätzen. Die Rechnung zur Ermittlung des relativen Nutzens je Use Case ist in Formel 1 abgebildet.

Relativer Nutzen



$$N_{x,j} = \frac{a_{x,1} + a_{x,2} + \dots + a_{x,n}}{n}$$
$$N_j = g_1 N_{1,j} + g_2 N_{2,j} + \dots + g_n N_{n,j}$$



$$N_j \geq G \rightarrow \text{Use Case 1}$$
$$N_j < G \rightarrow \text{Use Case 2}$$

Legende

$N_{x,j}$

Nutzen des Kriteriums x für den Use Case j

g_x

Gewichtungsfaktor für das Kriterium x

N_j

Gesamtnutzen für den Use Case j

$a_{x,n}$

Abschätzung des Nutzens des Kriteriums x durch Anspruchsgruppen n

n

Anzahl der Anspruchsgruppen

G

Grenzwert des Nutzens

Formel 1: Relative Bewertung des Nutzens je Use Case⁶⁹⁵

Für die Ermittlung des relativen Aufwandes wird ein Set mit Karten an die Anspruchsgruppen verteilt, das die Fibonacci-Folge enthält und nach einer Schätzung des Aufwandes für jeden Use Case fragt. Es ist jedoch nicht nur eine Schätzung für den Gesamtaufwand abzugeben, sondern jeweils für die oben genannten Bestandteile des Aufwandes. Demnach sind für den einmaligen Aufwand der Implementierungs-, der Change-, sowie der Schulungsaufwand zu schätzen. Aus den Schätzungen aller Anspruchsgruppen wird anschließend der Mittelwert gebildet. Der gesamte einmalige Aufwand ergibt sich aus der Addition der Einzelaufwände. Für den dauerhaften Aufwand wird lediglich eine Schätzung jeder Anspruchsgruppe für den gewählten Betrachtungszeitraum abgegeben. Der Betrachtungszeitraum ist identisch mit dem Betrachtungszeitraum des Nutzens zu wählen, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Auch für den dauerhaften Aufwand wird der Mittelwert aus den Schätzungen der

⁶⁹⁴ Vgl. Grenning (Planning poker or how to avoid analysis paralysis while release planning), 2002, S. 22-23.
⁶⁹⁵ Eigene Darstellung

Anspruchsgruppen gebildet. Die Bedeutung der Werte für die Abschätzung des Aufwandes wird genauso wie bei der Abschätzung des Nutzens durch einen Referenz Use Case festgelegt. Allerdings sollten beim Referenz Use Case die Werte des einmaligen Aufwandes nicht beliebig gewählt werden, sondern im Verhältnis miteinander stehen. Das bedeutet beispielsweise, dass die „5“ bei dem Implementierungsaufwand in etwa einer „5“ des Schulungsaufwandes entsprechen sollte. Dazu ist es notwendig, die Kosten des Aufwandes ungefähr einschätzen zu können. Der dauerhafte Aufwand kann unabhängig von dem einmaligen Aufwand abgeschätzt werden. Die Aufwände der restlichen Use Cases werden dann anhand des gewählten Referenz Use Cases abgeschätzt. Der abgeschätzte Aufwand wird anschließend mit in den Use Case aufgenommen. Die Rechnung zur Ermittlung des relativen Aufwands je Use Case ist in Formel 2 abgebildet.

Relativer Aufwand



$$A_{e,x,j} = \frac{b_{x,1} + b_{x,2} + \dots + b_{x,n}}{n}$$
$$A_{e,j} = \sum_1^4 A_{e,x,j}$$
$$A_{d,j} = \frac{b_1 + b_2 + \dots + b_n}{n}$$



UC _j	A _{e,j}	A _{d,j}	N _j
UC ₁	A _{e,1}	A _{d,1}	N ₁
UC ₂	A _{e,2}	A _{d,2}	N ₂
UC ₄	A _{e,4}	A _{d,4}	N ₄

Legende

UC_j

Use Case *j*

b_{x,n}

Abschätzung des Aufwandes des Kriteriums *x* durch Anspruchsgruppen *n*

A_{e,x,j}

Einmaliger Aufwand des Kriteriums *x* für den Use Case *j*

A_{e,j}

Einmaliger Aufwand für den Use Case *j*

A_{d,j}

Dauerhafter Aufwand für den Use Case *j*

N_j

Gesamtnutzen für den Use Case *j*

n

Anzahl der Anspruchsgruppen

Formel 2: Relative Bewertung des Aufwands je Use Case⁶⁹⁶

Nach der Durchführung der relativen Aufwand-Nutzen-Bewertung liegen für jeden Use Case bzw. jedes Use Case Konstrukt der einmalige Aufwand, der dauerhafte Aufwand und der Nutzen als relative Abschätzung vor. Dabei ist zu beachten, dass für die qualitative Bewertung des Aufwands und des Nutzens voneinander unabhängige Skalen verwendet werden. Um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, kann eine Referenzskala ausgewählt und die Werte der beiden anderen Skalen entsprechend normiert werden. In diesem Fall wird der einmalige Aufwand als Referenzskala verwendet. Für die Normierung wird jeweils für den dauerhaften Aufwand und den Nutzen ein Normierungsfaktor *F* berechnet. Die dazugehörige Berechnung ist

⁶⁹⁶ Eigene Darstellung

in Formel 3 unter (1) dargestellt. Mithilfe des ermittelten Normierungsfaktors können im zweiten Schritt die normierten Werte für den dauerhaften Aufwand sowie den Nutzen bestimmt werden. Die Berechnungsformel dazu ist in Formel 3 unter (2) dargestellt. Auf Basis des zweiten Schritts wird eine neue Tabelle mit dem einmaligen Aufwand A_e , dem normierten dauerhaften Aufwand $A_{d,n}$ sowie dem normierten Nutzen N_n erstellt. Die enthaltenen Werte haben nun einen einheitlichen Bezugspunkt. Die Kosten einer „5“ des einmaligen Aufwandes sind so hoch, wie die Kosten einer „5“ des dauerhaften Aufwandes sowie die Einsparungen einer „5“ des Nutzens. Somit ist eine Vergleichbarkeit der relativen Bewertung gegeben. Die beschriebene Tabelle ist in der nachfolgenden Formel 3 dargestellt.

Normierung

(1) Normierungsfaktor:

$$F_N = \frac{\frac{A_{e,j,t}}{K_{e,j,t}} \times E_{j,t}}{N_j}$$
$$F_{Ad} = \frac{\frac{A_{e,j,t}}{K_{e,j,t}} \times K_{d,j,t}}{A_{d,j,t}}$$

(2) Normierte relative Werte:

$$N_{n,j} = N_j \times F_N$$
$$A_{d,n,j,t} = A_{d,j,t} \times F_{Ad}$$

UC _j	A _{e,j}	A _{d,j}	N _j
UC ₁	A _{e,1}	A _{d,n,1}	N _{n,1}
UC ₂	A _{e,2}	A _{d,n,2}	N _{n,2}
UC ₄	A _{e,4}	A _{d,n,4}	N _{n,4}

Legende

UC_j

Use Case *j*

A_{e,j}

Einmaliger Aufwand für den Use Case *j*

A_{d,j}

Dauerhafter Aufwand für den Use Case *j*

N_j

Gesamtnutzen für den Use Case *j*

K_{e,j}

Kosten des einmaligen Aufwands für den Use Case *j*

K_{d,j}

Kosten des dauerhaften Aufwands für den Use Case *j*

E_j

Einsparungen für den Use Case *j*

F_N

Normierungsfaktor für den Nutzen

F_{Ad}

Normierungsfaktor für den dauerhaften Aufwand

A_{d,n,j}

Normierter dauerhafte Aufwand für den Use Case *j*

N_{n,j}

Normierter Gesamtnutzen für den Use Case *j*

Formel 3: Normierung der qualitativen Bewertung⁶⁹⁷

Quantitative Aufwands- und Nutzenbewertung

Die quantitative Bewertung von Aufwand und Nutzen spezifisch für jeden Use Case kann mithilfe verschiedener Methoden durchgeführt werden. Dazu gehören unter anderem die einfache Kosten- oder Gewinnvergleichsrechnung, die Rentabilitätsvergleichsrechnung, die Kapitalwertmethode oder die Vermögensendwertmethode. Allerdings weisen die Methoden Nachteile

⁶⁹⁷ Eigene Darstellung

auf. Entweder sind die Rechnungen sehr einfach gehalten und nur der Aufwand oder der Nutzen werden quantifiziert, oder es ist ein festgelegter Betrachtungszeitraum notwendig. Die Festlegung eines Betrachtungszeitraumes kann jedoch bei der Einführung von neuen Technologien und Use Cases schwierig sein. Zum einen können die Technologien divergierende Abschreibungszeiträume aufweisen und zum anderen ist die Abschätzung des Nutzungszeitraums nur schwer möglich. Aus diesem Grund wird die Amortisationszeit, die das Risiko einer Investition darstellt, als zentrale Kenngröße für die monetäre Bewertung der Use Cases eingesetzt. Steigt der Amortisationszeitraum, so steigt auch die Unsicherheit der Investition.⁶⁹⁸

Die Amortisationszeit wird statisch berechnet, da die Use Cases finanziell nicht sehr umfangreich sind. Außerdem sind durch die Abschätzung des Aufwandes und des Nutzens bereits Ungenauigkeiten in der Bewertung vorhanden. Bei einer statischen Amortisationsrechnung wird die Amortisationszeit auf Basis einer Durchschnittsperiode kalkuliert. Ein- und Auszahlungen werden für jede Periode gleich angenommen. Für die konkrete Berechnung sind die Kosten des einmaligen Aufwands K_e , die Kosten des dauerhaften Aufwands K_d und die Einsparung durch den Nutzen E zu ermitteln, sodass die absoluten Werte gegeben sind. Die Kosten des einmaligen Aufwands setzen sich wie bei der relativen Bewertung aus den Implementierungskosten, den Schulungskosten sowie den Kosten für den Change-Aufwand des Use Cases zusammen. Die Höhe der einzelnen Kosten sowie der Einsparungen ist stark abhängig von dem jeweiligen Unternehmen und sollte entsprechend durch Interviews oder mittels Erfahrungswissen erhoben werden. Anschließend kann die Amortisationszeit wie in Formel 4 dargestellt berechnet werden. Abschließend werden die Amortisationszeiten sowie die berechneten absoluten Werte in die Use Case Steckbriefe übertragen.

⁶⁹⁸ Vgl. Schuh et al. (Industrie 4.0: Implement it!), 2018, S. 43.

Amortisationszeitberechnung

1. Ermittlung der folgenden Parameter auf Basis der qualitativen Aufwand-Nutzen-Bewertung:

$K_{e,j}$ Kosten des einmaligen Aufwands für den Use Case j

$K_{d,j}$ Kosten des dauerhaften Aufwands für den Use Case j

E_j Einsparungen durch den Use Case j

2. Berechnung der Amortisationszeit:

$$AZ_j = \frac{K_{e,j}}{E_j - K_{d,j}}$$



UC_j	AZ_j	N_j
UC_1	AZ_1	N_1
UC_2	AZ_2	N_2
UC_4	AZ_4	N_4

Legende

UC_j Use Case j

AZ_j Amortisationszeit für den Use Case j

N_j Gesamtnutzen für den Use Case j

$K_{e,j}$ Kosten des einmaligen Aufwands für den Use Case j

$K_{d,j}$ Kosten des dauerhaften Aufwands für den Use Case j

E_j Einsparungen durch den Use Case j

Formel 4: Berechnung der Amortisationszeit⁶⁹⁹**5.2.3.5 Priorisierung der Use Cases und Ableitung einer Roadmap**

Die Priorisierung der Use Cases und die Ableitung einer Implementierungsroadmap unterstützen das anwendende Unternehmen bei der Entscheidung, welche Use Cases in welcher Reihenfolge umgesetzt werden sollen. Dazu werden die Ergebnisse zunächst grafisch dargestellt und anschließend eine Implementierungsreihenfolge abgeleitet.

Grafische Ergebnisdarstellung

Für die grafische Ergebnisdarstellung wird in Anlehnung an SCHUH ET AL. eine Portfoliomatrix genutzt. Auf der x-Achse der Portfoliomatrix ist die Amortisationszeit in Jahren, auf der y-Achse der Gesamtnutzen aufgetragen. Jeder Use Case wird in Form eines Kreises dargestellt. Die Variation des Durchmessers des Kreises ermöglicht die Einführung einer dritten Dimension, um beispielsweise die einmaligen Kosten abzubilden. Für eine bessere Entscheidungsfindung kann zusätzlich eine Indifferenzgerade in die Portfoliomatrix eingebunden werden. Die Indifferenzgerade beschreibt, wie viel höher der Gesamtnutzen eines Use Cases sein muss, um eine schlechtere Amortisationszeit auszugleichen und umgekehrt. Wird die Indifferenzgerade im Achsenkreuz gedreht, wird eine qualitativere oder quantitativere Bewertung erzielt. Außerdem kann eine Zielvorgabe für die Amortisationsdauer oder für den minimal zu erzielenden Ge-

⁶⁹⁹ Eigene Darstellung

samtnutzen vom Anwenderunternehmen definiert und in die Portfoliomatrix integriert werden.⁷⁰⁰ Sobald alle Use Cases in der Portfoliomatrix abgebildet sind, ist ein visueller Vergleich der Kombinationen möglich. Somit lässt sich die Kombination identifizieren, die den höchsten Gesamtnutzen und die geringste Amortisationszeit aufweist. In der nachfolgenden Abbildung 143 ist die Portfoliomatrix der Use Cases dargestellt.

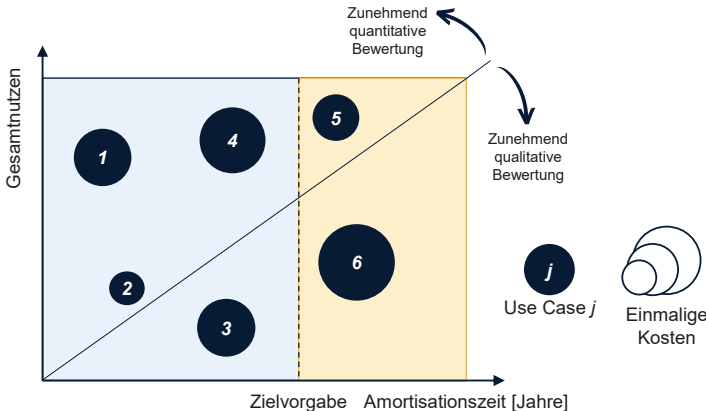


Abbildung 143: Grafische Ergebnisdarstellung der Use Case Bewertung⁷⁰¹

Ableitung einer Implementierungsroadmap

Auf Basis der grafischen Ergebnisdarstellung kann im zweiten Schritt die Umsetzungsreihenfolge der Use Cases unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Investitionsbudgets abgeleitet werden. Use Cases, die die festgelegte Zielvorgabe für die Amortisationszeit oder den minimalen Gesamtnutzen nicht einhalten, werden kategorisch von der Umsetzung ausgeschlossen. Die restlichen Use Cases werden mit der Indifferenzgerade sowohl vertikal als auch horizontal verbunden. Das Ergebnis ist in Abbildung 144 beispielhaft an Use Case 1 dargestellt. Sobald alle Use Cases mit der Indifferenzgeraden verbunden sind, kann mit der Priorisierung begonnen werden. Grundsätzlich werden Use Cases oberhalb der Indifferenzgerade bevorzugt, da sie einen höheren Gesamtnutzen aufweisen. Als Erstes wird der Use Case umgesetzt, der die größte Distanz zur Indifferenzgeraden aufweist und das Budget nicht überschreitet. Die restlichen Use Cases sind absteigend der Distanz der Schnittpunkte zur Indifferenzgeraden zu wählen. Die Use Cases oberhalb der Indifferenzgeraden können so lange umgesetzt werden, bis das gesamte Investitionsbudget erschöpft ist. Für den Fall, dass bereits alle Use Cases oberhalb der Indifferenzgeraden umgesetzt sind und noch Budget zur Verfügung steht, können auch Use Cases unterhalb der Indifferenzgeraden umgesetzt werden. Es ist zu beachten, dass die Reihenfolge, im Gegensatz zu Use Cases oberhalb der Indifferenz-

⁷⁰⁰ Vgl. Schuh et al. (Industrie 4.0: Implement it!), 2018, S. 48-49.

⁷⁰¹ Eigene Darstellung

geraden, vertauscht ist. Hintergrund ist hier, dass der Gesamtnutzen unterhalb der Indifferenzgeraden mit zunehmendem Abstand zur Indifferenzgeraden abnimmt. Die Umsetzungsreihenfolge beginnt entsprechend mit der kleinsten Distanz der Schnittpunkte zur Indifferenzgeraden und wird aufsteigend gewählt. Kann ein Use Case aufgrund von zu wenig Investitionsbudget nicht umgesetzt werden, ist zu prüfen, ob die nächste Kombination in der Reihenfolge umsetzbar ist. Die Umsetzungsreihenfolge und die Kalkulation des Restbudgets können in einer Tabelle festgehalten werden. In der nachfolgenden Abbildung 144 ist das Vorgehen, die Implementierungsroadmap der Use Cases sowie die Tabelle mit Umsetzungsreihenfolge und Restbudget dargestellt.

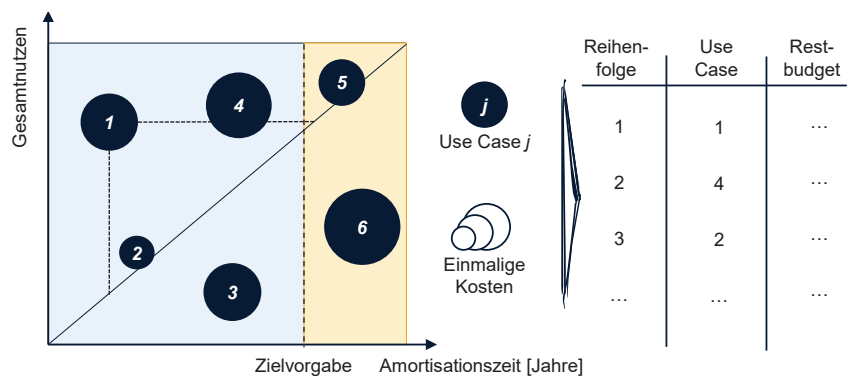


Abbildung 144: Ableitung einer Implementierungsroadmap⁷⁰²

5.3 Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement

Das Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement beschreibt das operative Kooperations- und Lernverhalten über den gesamten Werkzeuglebenszyklus. Es wird im Folgenden detailliert erläutert. Für die erfolgreiche Umsetzung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse ist ein zielgerichteter und adressatengerechter Informationsfluss essenziell. Nur wenn Erkenntnisse, die von einer Person zu einem spezifischen Zeitpunkt über den Werkzeuglebenszyklus gewonnen werden, einer anderen Person zu einem anderen Zeitpunkt anwendungsfall- und adressatenorientiert bereitgestellt werden können, ist sichergestellt, dass Optimierungspotenziale zeitnah und nachhaltig umgesetzt und Kosteneinsparungen realisiert werden können.

Dazu ist ein Austausch von Informationen über den gesamten Werkzeuglebenszyklus sowohl innerbetrieblich als auch zwischen Werkzeugbaubetrieben und ihren Kunden, den Serienproduzenten, notwendig. Im Kontext der digitalen Vernetzung erfolgt der Austausch von Daten,

⁷⁰² Eigene Darstellung

Informationen und Wissen innerhalb der Organisation als auch zwischen Werkzeugbaubetrieben und ihren Kunden idealerweise plattformbasiert.⁷⁰³ Auf einer solchen digitalen übergreifenden Wissensplattform ist sowohl der Werkzeugbau als auch sein Kunde, der Serienproduzent, vertreten. Die Plattform dient dem bilateralen Austausch von Daten, Informationen und Wissen zur Werkzeugerstellung, Werknutzung und Werkzeugverschrottung. Gemeinsam wird die Zielsetzung verfolgt, die Werkzeuglebenszykluskosten sowie die Werkzeugkosten je produziertem Endprodukt zu senken.

Für die Umsetzung eines übergreifenden Wissensmanagements ist zunächst die Identifikation der relevanten Wissensinkremente für die unterschiedlichen Anwendergruppen entlang des Werkzeuglebenszyklus notwendig. Darauf folgt die Entwicklung einer Systematik zur Verknüpfung eines Wissensinkrements mit der dazugehörigen spezifischen Werkzeugkomponente, auch Werkzeuginstanz genannt. Nur so kann gewährleistet werden, dass alle relevanten Wissensinkremente übergreifend der jeweiligen Werkzeugkomponente zugerechnet werden können.

Der dritte Aspekt stellt die Entwicklung eines strukturierten Vorgehens für die anforderungsgerechte, nutzerfreundliche und zeitnahe Dokumentation von Wissen dar, um eine spätere automatisierte Auswertung und Nutzbarmachung des gesammelten Wissens zu ermöglichen. Dazu folgt die Entwicklung eines Vorgehens für den bedarfsgerechten und nutzerfreundlichen Abruf von Wissen entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus sowohl durch den Werkzeugbau als auch durch den Serienproduzenten. Das Ergebnis des Gestaltungselements ist ein werkzeuglebenszyklusübergreifendes Wissensmanagementkonzept für unterschiedliche Nutzergruppen. Die Gestaltungsaspekte des Gestaltungselements Übergreifendes Wissensmanagement sind in Abbildung 145 dargestellt.

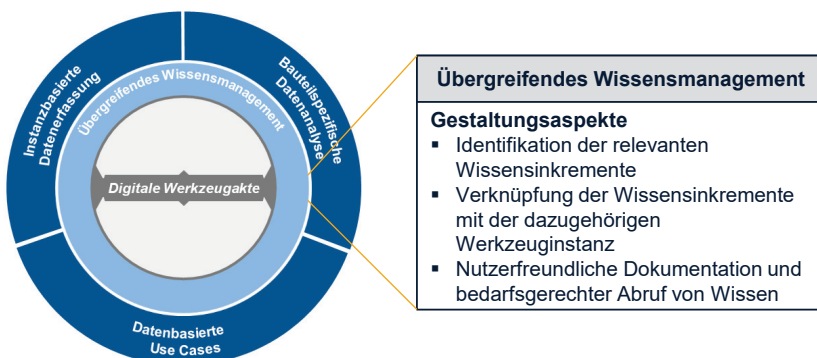


Abbildung 145: Aspekte des Gestaltungselements Übergreifendes Wissensmanagement⁷⁰⁴

Inhaltlich basieren die in diesem Kapitel beschriebenen Inhalte auf mehreren durch den Autor durchgeführten oder begleiteten Konsortial- und Industrieprojekten zu den Themen digitale

⁷⁰³ Vgl. Boos et al. (Corporate Tooling), 2022, S. 21.

⁷⁰⁴ Eigene Darstellung

Erfassung und Auswertung von Werkzeugstandmengen, effiziente Werkzeuginstandhaltung während der Serienproduktion sowie Konzeption und Umsetzung einer digitalen Werkzeugakte. In Zusammenarbeit mit zahlreichen und namhaften Vertretern des Werkzeugbaus, der Serienproduktion sowie der Werkzeuginstandhaltung sind die Herausforderungen eines werkzeublebenszyklusübergreifenden Wissensmanagements diskutiert, Anforderungen abgeleitet und gemeinsam Konzepte für eine nutzerfreundliche Wissensabgabe und eine bedarfsgerechte Wissensbereitstellung entlang des Werkzeublebenszyklus erarbeitet und diskutiert worden.

5.3.1 Grundlagen

Methodisch orientiert sich dieses Kapitel am Stand der Wissenschaft im Bereich Wissensmanagement, der nachfolgend überblicksweise vorgestellt wird. Nach NORTH ist es das Ziel einer wissensorientierten Unternehmensführung, aus Informationen Wissen zu generieren und dieses Wissen nachhaltig in Wettbewerbsvorteile umzusetzen, die dann als Geschäftserfolge messbar werden. Die Bayer AG hat in diesem Zusammenhang den Satz geprägt, dass Forschung die Umwandlung von Geld in Wissen und Innovation die Umwandlung von Wissen in Geld ist.⁷⁰⁵

Für ein einheitliches Verständnis des Begriffs Wissen werden zunächst die grundlegenden Definitionen und Zusammenhänge der Elemente Zeichen, Daten, Informationen, Wissen, Kompetenz und Wettbewerbsfähigkeit erläutert und abschließend in der Wissenstreppe nach NORTH dargestellt. Zeichen stehen an unterster Stelle in der Hierarchie und dienen als Oberbegriff für Buchstaben, Ziffern oder Sonderzeichen. Zeichen werden zu Daten durch die Anwendung von Ordnungsregeln wie z.B. einem Code oder einer Syntax. Diese Daten sind zunächst nicht interpretierbar und lediglich beliebige Zeichen bzw. Zeichenfolgen. Erst wenn ein Bezug zu dem Kontext hergestellt wird, werden Daten zu Informationen. Solche Informationen sind für den Betrachtenden zunächst wertlos, da sie nicht mit anderen Informationen vernetzt werden können. Wertvoll werden die Informationen erst dann, wenn eine Vernetzung der Informationen stattfindet und daraus Wissen entsteht. Informationen dienen demnach als Rohstoff, aus dem Wissen generiert wird.⁷⁰⁶

Allerdings muss berücksichtigt werden, dass Informationen besonders in verschiedenen kulturellen Kontexten unterschiedlich interpretiert werden können. Wissen entsteht durch die Vernetzung verschiedener Informationen.⁷⁰⁷ Für die vorliegende Arbeit wird der Begriff Wissen in Anlehnung an PROBST ET AL. verwendet, welcher wie folgt definiert ist:⁷⁰⁸

„Wissen bezeichnet die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Dies umfasst sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Alltagsregeln und Handlungsanweisungen. Wissen stützt sich auf Da-

⁷⁰⁵ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 35.

⁷⁰⁶ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 36-37.

⁷⁰⁷ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 37-38.

⁷⁰⁸ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 35-38.

*ten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden. Es wird von Individuen konstruiert und repräsentiert deren Erwartungen über Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge.*⁷⁰⁹

Laut NORTH besteht das Ziel der wissensorientierten Unternehmensführung darin, dass das aus den Informationen generierte Wissen in nachhaltige Wettbewerbsvorteile umgewandelt wird, die letztendlich als Geschäftserfolge sichtbar werden. Dazu wird das Wissen in Können umgesetzt und das Können durch Handlungen unter Beweis gestellt. Entscheidende Faktoren dabei sind das Wollen und Dürfen. Zum einen muss eine Motivation vorhanden sein und zum anderen müssen Mitarbeitende den Freiraum haben, um ihr Können unter Beweis zu stellen.⁷¹⁰ Die Fähigkeit, das Wissen situationsabhängig in Handlungen umzusetzen, wird als Kompetenz bezeichnet und unterscheidet den Lehrling vom Meister oder die erfolgreiche Sportmannschaft vom brillanten Einzelspieler.⁷¹¹ Kernkompetenzen einer Organisation sind von hoher Bedeutung, um Wettbewerbsvorteile zu schaffen.⁷¹²

*„Kernkompetenzen sind ein Verbund von Fähigkeiten und Technologien, der auf explizitem und implizitem Wissen beruht und durch zeitliche Stabilität und produktübergreifenden Einfluss gekennzeichnet ist.“*⁷¹³

Kernkompetenzen zeichnen sich dadurch aus, dass sie einen Mehrwert beim Kunden generieren, den Zugang zu neuen Märkten schaffen, nicht leicht imitier- oder transferierbar sind, sich synergetisch mit anderen Kompetenzen verbinden und dadurch das Unternehmen einzigartig bzw. besser als andere Unternehmen machen.⁷¹⁴ In der vorgestellten Sichtweise repräsentieren Kernkompetenzen die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens.⁷¹⁵ In der nachfolgenden Abbildung 146 ist die Wissenstreppe nach NORTH zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit dargestellt.⁷¹⁶

⁷⁰⁹ Vgl. Probst et al. (Wissen managen), 2012, S. 23.

⁷¹⁰ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 35-39.

⁷¹¹ Vgl. Erpenbeck (Handbuch Kompetenzmessung), 2007, S. 3-4.

⁷¹² Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 39.

⁷¹³ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 39.

⁷¹⁴ Vgl. Krogh; Venzin (Anhaltende Wettbewerbsvorteile durch Wissensmanagement), 1995, S. 423.

⁷¹⁵ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 39.

⁷¹⁶ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 3714 - Blatt 2), 2022, S. 3.; Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 33-39.



Abbildung 146: Wissenstreppe nach North⁷¹⁷

Die Unterscheidung zwischen explizitem und implizitem Wissen wird im Folgenden genauer erläutert. In der Literatur wird Wissen häufig in implizites und explizites Wissen eingeteilt. Diese Unterscheidung lässt sich zurückführen auf POLANYI, der die Begriffe „tacit knowledge“ und „explicit knowledge“ eingeführt hat.⁷¹⁸ Implizites Wissen, auch „tacit knowledge“ genannt, ist persönlich und kontextspezifisch. Es umfasst die Ideale, Werte und Gefühle von einer Person, die tief in den Handlungen und Erfahrungen verankert sind. Implizites Wissen wird häufig durch die Erziehung unterbewusst übernommen und von den Personen abgespeichert, weshalb es sich dem formalen Ausdruck entzieht und nur schwer kommunizierbar ist.⁷¹⁹ Implizites Wissen ist zum Beispiel das kunstvolle Spielen eines Instrumentes oder die Fehlerdiagnose an einer Maschine.⁷²⁰ Explizites Wissen hingegen kann formuliert und durch die systematische Sprache artikuliert werden.⁷²¹ Außerdem kann explizites Wissen in einer formalen Form auch in Daten umgewandelt oder verarbeitet werden. Es handelt sich um Wissen außerhalb der Köpfe einzelner Personen und kann durch Digitalisierung in Theorien oder Handlungsanweisungen überführt werden. Beispiele für explizites Wissen sind detaillierte Prozessbeschreibungen, Patente oder Organigramme.

Des Weiteren wird Wissen in der Literatur in individuelles und kollektives Wissen unterteilt. Als individuelles Wissen wird das Wissen einer Einzelperson verstanden, wo hingegen das kollektive Wissen das Wissen einer Gruppe bzw. Organisation ist. Dabei stellt das kollektive Wissen nicht nur die Summe des individuellen Wissens der Gruppen- bzw. Organisationsmitglieder dar, sondern auch „Spielregeln“, Standards oder die Unternehmenskultur.⁷²² Zusammen bilden das individuelle und kollektive Wissen die organisationale Wissensbasis und grenzen das

⁷¹⁷ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 37.

⁷¹⁸ Vgl. Polanyi (The tacit dimension), 1966.

⁷¹⁹ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 48-49.

⁷²⁰ Vgl. Pawlowsky (Wissensmanagement), 2019, S. 113.

⁷²¹ Vgl. Nonaka; Takeuchi (Die Organisation des Wissens), 2012, S. 76.

⁷²² Vgl. Pawlowsky (Wissensmanagement), 2019, S. 113-115.

einer Organisation zur Verfügung stehende Wissen ab. Zwar stellt das Individuum mit der Fähigkeit, aus Daten Wissen zu transformieren und dieses als Wettbewerbsvorteil zu nutzen, den zentralen Tragenden der Wissensbasis dar, jedoch kann die Wissensbasis nicht nur aus der Perspektive des Individuums betrachtet werden. Ein erfolgreiches Agieren von Organisationen erfordert neben der individuellen Perspektive auch Elemente des kollektiven Wissens, da erst das erfolgreiche Zusammenspiel von Beteiligten zu funktionierenden Prozessen führt.⁷²³

Aus den vorausgegangenen Erläuterungen lässt sich ableiten, dass Wissen auf verschiedene Arten und Weisen existiert und in verschiedene Bezüge eingebettet ist, zwischen denen zu vermitteln ist.⁷²⁴ Außerdem hat die Ressource Wissen als Produktions- und Wettbewerbsfaktor eine hohe Relevanz für Organisationen und muss daher im operativen und strategischen Management besonders beachtet werden.⁷²⁵ In der bestehenden Literatur existieren einige Wissensmanagementmodelle, die unterschiedliche Sichtweisen auf die Aufgaben im Unternehmen oder das jeweilige Wissensmanagementverständnis haben. In der alten Literatur wird oft zwischen einem humanorientierten und technologischen Ansatz des Wissensmanagements unterschieden. Bei dem humanorientierten Ansatz ist die Person oder das Individuum der zentrale Wissensträger, der durch das Wissensmanagement zur Partizipation an allgemeinen Lernprozessen und zur Vermittlung persönlichen Wissens mit Organisationsmitgliedern angeregt werden soll. Zusätzlich sollen auch soziale Aspekte berücksichtigt werden wie das Aufbauen von Netzwerken und Kontakten. Im Gegensatz zu dem humanorientierten Ansatz wird bei dem technologischen Ansatz von der Existenz einer organisatorischen Wissensbasis ausgegangen, sodass mit Hilfe von innovativen Technologien Wissen in der Organisation erfasst, erweitert, genutzt und auch verteilt werden kann. Da der humanorientierte Ansatz dabei außer Acht gelassen wird und die reine technische Realisierung des Wissensmanagements die Organisationsmitglieder nicht dazu bewegt, ihr Wissen zu erweitern oder mit anderen zu teilen, kann der technologische Ansatz nur als zweite Stufe im Prozess des organisatorischen Wandels berücksichtigt werden.⁷²⁶ Werden jedoch aktuelle Veröffentlichungen betrachtet, werden immer häufiger Lösungsansätze entwickelt, die einen integrativen Ansatz des Wissensmanagements verfolgen. Das bedeutet, der humanorientierte und der technologische Ansatz werden miteinander verbunden, um Synergieeffekte zu erzielen und das Aufgabenfeld des Wissensmanagements vollumfänglich abzudecken.⁷²⁷ Auf zwei bekannte und häufig zitierte integrative Ansätze wird im Folgenden näher eingegangen.

Das Wissensmanagementmodell nach NONAKA UND TAKEUCHI beschreibt die Schaffung und Verbreitung von Wissen im Unternehmen. Das Modell unterscheidet zwischen implizitem und explizitem Wissen und nennt als Schlüssel der Wissensschaffung die Umwandlung von implizitem zu explizitem Wissen. Wenn implizites Wissen in explizites Wissen umgewandelt wird, kann es unternehmensweit und unabhängig vom Wissenstragenden genutzt werden. Bei einem Zusammentreffen von implizitem und explizitem Wissen ergeben sich vier Formen

⁷²³ Vgl. Probst et al. (Wissen managen), 2012, S. 18.

⁷²⁴ Vgl. Dick; Wehner (Wissensmanagement zur Einführung: Bedeutung, Definition, Konzepte), 2002, S. 10.

⁷²⁵ Vgl. Kern; Müller (Digitales Wissensmanagement oder die Frage: Kann Wissen online gemanagt werden?), 2020, S. 2.; Vgl. Rehäuser; Krcmar (Wissensmanagement in Unternehmen), 1996, S. 17.

⁷²⁶ Vgl. Lehner (Wissensmanagement), 2021, S. 60-61.

⁷²⁷ Vgl. Lehner (Wissensmanagement), 2021, S. 61-62.

der Wissensumwandlung.⁷²⁸ Diese sind in Abbildung 147 dargestellt und werden nachfolgend näher erläutert.

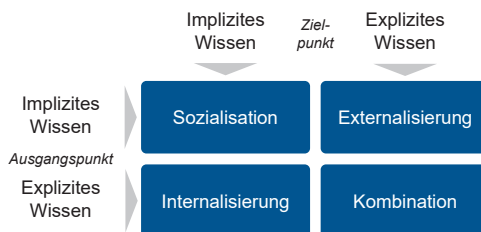


Abbildung 147: Formen der Wissensumwandlung⁷²⁹

Sozialisierung bezeichnet die Umwandlung von implizitem zu implizitem Wissen. Es ist ein Erfahrungsaustausch, der nicht verbal, sondern durch Beobachtung oder Nachahmung stattfindet. NONAKA UND TAKEUCHI nennen als Beispiel das Lernen eines Lehrlings von seinem Meister. Das handwerkliche Geschick kann der Lehrling durch Beobachtung, Nachahmung und Praxis erlernen. Grundlage für die Aneignung impliziten Wissens ist die gemeinsame Erfahrung, um sich in die Denkweise des anderen hineinversetzen zu können.⁷³⁰

Bei der Externalisierung handelt es sich um die Umwandlung von implizitem zu explizitem Wissen. Hierbei wird implizites Wissen durch Metaphern, Analogien, Modelle oder Hypothesen beschrieben. Zwar sind diese Beschreibungen oftmals unzureichend oder unlogisch, jedoch können diese Diskrepanzen und Lücken die Reflexion und Interaktion fördern. Das Wissen kann im Gegensatz zur Sozialisierung durch diesen Prozess der gesamten Organisation zugänglich gemacht werden.

Die Kombination beschreibt einen Prozess, bei dem explizites Wissen mit anderem explizitem Wissen verknüpft wird. Es kann zum einen der Austausch bzw. die Kombination von Wissen über Medien wie Dokumente, Besprechungen, Telefon oder Computernetze realisiert werden. Zum anderen kann eine Neuzusammenstellung von explizitem Wissen durch Sortieren, Hinzufügen, Kombinieren oder Klassifizieren von Wissen erreicht werden.⁷³¹

Die letzte Form der Wissensumwandlung ist die Internalisierung, die nahe verwandt ist mit dem „learning-by-doing“. Hierbei wird explizites Wissen in implizites Wissen umgewandelt, wobei das Festhalten des Wissens in Dokumenten, Handbüchern oder mündlichen Geschichten fördernd sein kann. Wenn Erfahrungen durch Sozialisierung, Externalisierung oder Kombination internalisiert werden, entsteht wertvolles Wissenskapital. Allerdings wird darauf hingewiesen,

⁷²⁸ Vgl. Nonaka; Takeuchi (Die Organisation des Wissens), 2012, S. 72-73.

⁷²⁹ Vgl. Nonaka; Takeuchi (Die Organisation des Wissens), 2012, S. 79.

⁷³⁰ Vgl. Nonaka; Takeuchi (Die Organisation des Wissens), 2012, S. 80-81.

⁷³¹ Vgl. Nonaka; Takeuchi (Die Organisation des Wissens), 2012, S. 81-87.

dass die vier Formen der Wissensumwandlung allein betrachtet nur begrenzt zur Wissensschaffung beitragen können und auch die reine Kombination von Wissen nicht zur Erweiterung des Unternehmenswissens führt.⁷³²

Erst die dynamische Interaktion von explizitem und implizitem Wissen führt zu Innovation. Die Formen der Wissensumwandlungen müssen demnach eine Wissensspirale zur Wissensschaffung durchlaufen und sind in Abbildung 148 dargestellt. NONAKA UND TAKEUCHI unterscheiden bei der Wissensspirale zwischen der epistemologischen Dimension und der ontologischen Dimension.⁷³³

In der epistemologischen Dimension wird die Differenzierung zwischen implizitem und explizitem Wissen betrachtet. Dagegen beschreibt die ontologische Dimension die Ebenen der Wissensserzeugung. Darunter fallen das Individuum, die Gruppe, das Unternehmen und die Interaktion zwischen Unternehmen. Die epistemologische Wissensspirale startet mit der Sozialisation. Hier werden in einem geeigneten Kontext Erfahrungen und mentale Modelle basierend auf einem Interaktionsfeld ausgetauscht. Bei der Externalisierung wird dieses geteilte Wissen anschließend durch die Kommunikation mithilfe von Metaphern und Analogien zu explizitem Wissen. Dieses neue Wissen wird dann mit bereits bestehendem Wissen verknüpft, sodass die verfügbare Wissensmenge einer Organisation größer wird. Schließlich wird dieses Wissen durch die Organisationsmitglieder internalisiert und das Wissen kann zu einer Innovation führen. Häufig stößt das einen erneuten Durchlauf der Wissensspirale an. Die Wissensspirale auf ontologischer Ebene beginnt damit, das implizite Wissen der Organisationsmitglieder zu mobilisieren. Das Wissen im Unternehmen wird durch die vier Formen der Wissensumwandlung verstärkt und stößt so in immer höhere ontologische Schichten vor, ausgehend vom Einzelnen, über Teams, in das Unternehmen und sogar weiter über die Unternehmensgrenzen hinaus. Die Wissensspirale ist demnach ein Spiralprozess, der immer mehr Interaktionsgemeinschaften erfasst.⁷³⁴

⁷³² Vgl. Nonaka; Takeuchi (Die Organisation des Wissens), 2012, S. 87-89.

⁷³³ Vgl. Nonaka; Takeuchi (Die Organisation des Wissens), 2012, S. 89-93.

⁷³⁴ Vgl. Nonaka; Takeuchi (Die Organisation des Wissens), 2012, S. 89-93.

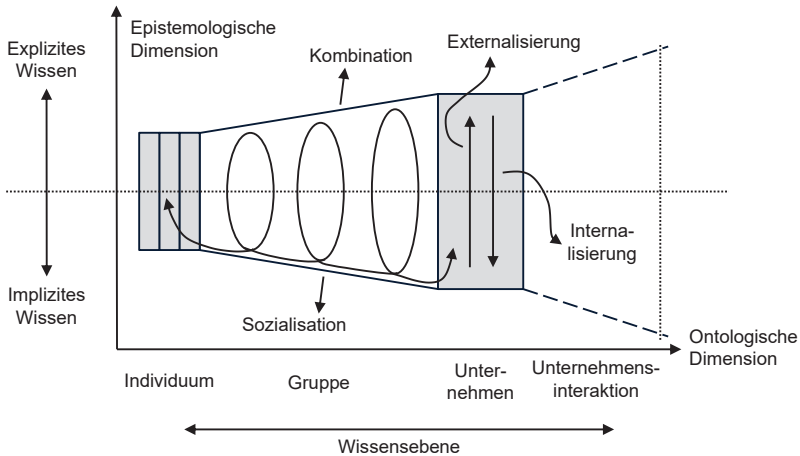


Abbildung 148: Wissensspirale⁷³⁵

PROBST ET AL. haben einen integrierten Bezugsrahmen entwickelt, der die Kernprozesse und Hauptproblemfelder des Wissensmanagements beinhaltet. Die sogenannten Bausteine des Wissensmanagements sollen Unternehmen und Führungskräften den Umgang mit der Resource Wissen vereinfachen und ihnen praxistaugliche und umsetzbare Anregungen mitgeben. Insgesamt besteht das Modell aus acht Bausteinen und ist in Abbildung 149 abgebildet. Sechs Bausteine decken die operativen Aufgaben ab, während die zwei weiteren Bausteine den strategischen Rahmen bilden. Die einzelnen Bausteine werden im Folgenden näher beschrieben. Die Wissensidentifikation umfasst die Analyse und Beschreibung des Wissensumfeldes eines Unternehmens. Das Ziel eines effektiven Wissensmanagements ist es, durch ein hinreichendes Maß an interner und externer Transparenz dem Mitarbeitenden dabei zu helfen, einen Überblick über interne und externe Daten sowie Informationen und Fähigkeiten zu behalten. Mangelnde Transparenz kann zu ineffizienten und uninformatierten Entscheidungen führen. Bei dem Wissenserwerb handelt es sich um den Erwerb von externem Wissen, das im Unternehmen nicht vorhanden ist. Sowohl durch Beziehungen zu Lieferanten, Konkurrenten oder Kooperationspartnern, also durch die Rekrutierung von Experten und Akquisition von innovativen Unternehmen, kann externes Wissen erworben werden. PROBST ET AL. weisen auf das häufig ungenutzte Potenzial hin, das sich aus einer fehlenden systematischen Umsetzung des Wissensmanagements ergibt.⁷³⁶

⁷³⁵ Vgl. Nonaka; Takeuchi (Die Organisation des Wissens), 2012, S. 92.

⁷³⁶ Vgl. Probst et al. (Wissen managen), 2012, S. 27-31.

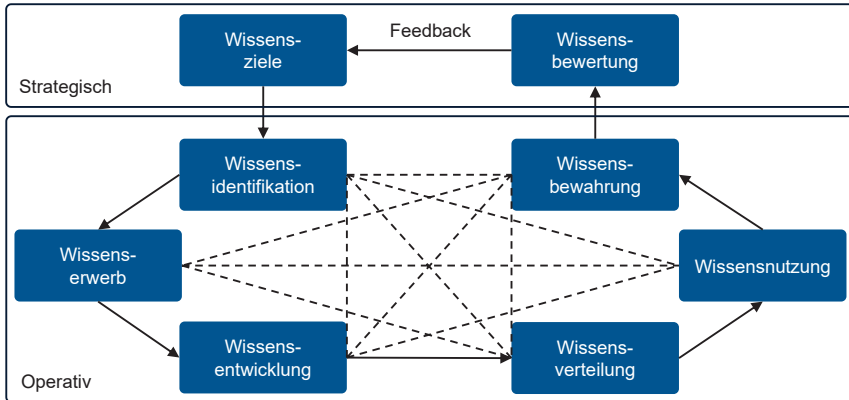


Abbildung 149: Kernprozesse des Wissensmanagements⁷³⁷

Neben dem Wissenserwerb adressiert auch die Wissensentwicklung die Steigerung des Unternehmenswissens. Hier steht allerdings die Entwicklung neuer Fähigkeiten, neuer Produkte, Ideen und leistungsfähiger Prozesse im Vordergrund. Es werden alle Managementanstrengungen betrachtet, die sich bewusst mit der Entwicklung intern noch nicht bestehender oder extern noch nicht existierender Fähigkeiten auseinandersetzen. Dieser Baustein ist für die Untersuchung des Umgangs mit neuen Ideen und der Nutzung der Kreativität im Unternehmen zuständig.⁷³⁸

Der Baustein Wissensverteilung beschäftigt sich mit der Verteilung bereits vorhandenen Wissens innerhalb eines Unternehmens. Die Verteilung von Erfahrungen in der Organisation ist eine Voraussetzung dafür, Informationen oder Erfahrungen für die gesamte Organisation nutzbar zu machen. Dabei ist zu beachten, dass nicht jeder Mitarbeitende das gesamte Wissen haben muss, sondern dass der Wissensverteilungsumfang sinnvoll beschrieben und gesteuert wird. Dazu muss besonders der Übergang von Wissen vom Individuum zur Organisation analysiert werden. Die Wissensnutzung stellt das Ziel und den Zweck eines Wissensmanagements dar. Es ist der produktive Einsatz des Wissens zum Nutzen des Unternehmens. Die Nutzung von wertvollen Fähigkeiten und Wissensbeständen, die zuvor durch Identifikation, Erwerb, Entwicklung und Verteilung aufgebaut worden sind, sind durch geeignete Maßnahmen sicherzustellen. In dem Prozess der Wissensbewahrung werden verschiedene organisationale Speichermedien für Wissen effizient genutzt, sodass einmal erworbene Fähigkeiten, Erfahrungen oder Informationen aufbewahrt und regelmäßig aktualisiert werden können. Dies soll dem Wissensverlust oder dem Preisgeben wertvoller Expertise durch Reorganisationen vorbeugen.⁷³⁹

⁷³⁷ Vgl. Probst et al. (Wissen managen), 2012, S. 34.

⁷³⁸ Vgl. Probst et al. (Wissen managen), 2012, S. 31.

⁷³⁹ Vgl. Probst et al. (Wissen managen), 2012, S. 32.

Ergänzend zu den sechs operativen Bausteinen beinhaltet das Modell von PROBST ET AL. zwei strategische Bausteine. Die Wissensziele geben eine Richtung des Wissensmanagements vor. Dabei wird in Anlehnung an das Sankt Galler Managementkonzept zwischen normativen, strategischen und operativen Zielen differenziert. Während die normativen Wissensziele die Schaffung einer wissensbewussten Unternehmenskultur betreffen, fokussieren sich die strategischen Wissensziele darauf, den zukünftigen Kompetenzbedarf des Unternehmens anhand des Kernwissens zu definieren. Operative Wissensziele, welche die normativen und strategischen Zielvorgaben konkretisieren, dienen zur Umsetzung des Wissensmanagements. Durch die Wissensbewertung wird das Erreichen der normativen, strategischen und operativen Zielvorgaben überprüft. Die durch das Wissensmanagement verursachte Ressourcenbelegung wird durch einen Wirksamkeitsnachweis gerechtfertigt. Außerdem können durch diesen Prozess Kurskorrekturen bei der Durchführung von Wissensmanagementprojekten vorgenommen werden.⁷⁴⁰

Durch den steigenden Einsatz von 4.0-Technologien auf Basis künstlicher Intelligenz werden viele Bereiche der Arbeit beeinflusst.⁷⁴¹ Auch die Art der Wissensaufnahme und -verwertung im Arbeitsprozess wird dadurch verändert, sodass der Umgang mit Wissen angepasst werden muss.⁷⁴² NORTH UND RONALD bezeichnen dies als Wissensgesellschaft 4.0.⁷⁴³ Besonders durch Informations- und Kommunikationstechnologien ergeben sich neue Möglichkeiten, wie Menschen sich informieren, kommunizieren und interagieren. Der Umgang mit Informationen, die zu Wissen generiert werden, verändert sich. Allerdings substituiert dieses digitale Wissensmanagement nicht das analoge Wissensmanagement, sondern beide Ansätze müssen miteinander verknüpft betrachtet werden. Grund dafür ist die Bindung von Wissen an ein Individuum, ohne das ein rein digitales Wissensmanagement nicht möglich ist.⁷⁴⁴

Zur Unterstützung von sowohl analogen als auch digitalen Wissensmanagementaktivitäten können Wissensmanagementinstrumente genutzt werden. Beispiele für analoge Wissensmanagementinstrumente sind Best Practices, Jour fixe, Lessons Learned oder Story Telling. Dagegen handelt es sich bei Social Software, Wikis, SharePoints oder intelligenten digitalen Assistenten um Instrumente des digitalen Wissensmanagements.⁷⁴⁵ Die Digitalisierung stellt Organisationen sowohl auf strategischer Ebene als auch auf operativer Ebene vor herausfordernde Veränderungen.⁷⁴⁶ Aus strategischer Sicht müssen sich Organisationen darüber bewusst werden, wie groß der Anteil von analogem und digitalem Wissensmanagement sein soll. Denn trotz der Digitalisierung ist der Mensch als Träger von individuellem Wissen von sehr hoher Bedeutung und die reine Bereitstellung einer IT-Infrastruktur ist nicht ausreichend für ein Wissensmanagement. Zusätzlich müssen sich Organisationen mit den Wissenszielen, der

⁷⁴⁰ Vgl. Probst et al. (Wissen managen), 2012, S. 32-35.

⁷⁴¹ Vgl. Offensive Mittelstand - Gut für Deutschland (Umsetzungshilfen Arbeit 4.0), 2019, S. 8.

⁷⁴² Vgl. Offensive Mittelstand - Gut für Deutschland (Umsetzungshilfen Arbeit 4.0), 2019, S. 130.

⁷⁴³ Vgl. North; Maier (Wissen 4.0 – Wissensmanagement im digitalen Wandel), 2018, S. 667.

⁷⁴⁴ Vgl. Kern; Müller (Digitales Wissensmanagement oder die Frage: Kann Wissen online gemanagt werden?), 2020, S. 6-7.

⁷⁴⁵ Vgl. Kern; Müller (Digitales Wissensmanagement oder die Frage: Kann Wissen online gemanagt werden?), 2020, S. 7-9.

⁷⁴⁶ Vgl. North; Maier (Wissen 4.0 – Wissensmanagement im digitalen Wandel), 2018, S. 672.

Bewertung der Ziele und der Integration des Wissensmanagements in andere Managementansätze auseinanderzusetzen.⁷⁴⁷

Auf operativer Ebene ergeben sich Herausforderungen bezüglich der Organisation, der Technik und des Menschen. Da sich durch die Digitalisierung gerade explizite Wissensbestände enorm vergrößern und unüberschaubar werden, sollte innerhalb der Organisation eine Rolle definiert werden, die für die Ressource Wissen verantwortlich ist. Diese Person hat die Aufgabe, einen Überblick über das gesamte Wissen zu behalten und zu entscheiden, ob das Wissen relevant, veraltet, qualitätsgesichert und datenschutzkonform ist. Aus technischer Sicht ist es für eine Organisation von Vorteil, mit einer integrativen Plattform für Wissensmanagement zu arbeiten. Diese Plattform sollte unterschiedliche Tools einbinden und die Verknüpfung von Wissen und Prozessen ermöglichen.⁷⁴⁸ Außerdem sollte die genutzte Wissensmanagementplattform eine hohe Benutzerfreundlichkeit aufweisen und Funktionen beinhalten, die einen hohen Nutzen im Rahmen des Wissensmanagements stiften. Auch der Mensch spielt auf operativer Ebene eine bedeutende Rolle. Trotz der Möglichkeiten des digitalen Wissensmanagements, Individuen durch strukturiertes und verfügbares explizites Wissen zu vernetzen, bleibt das Erfahrungswissen von Experten von hoher Bedeutung. Aus diesem Grund befasst sich die operative Ebene mit den Aufgaben von Organisationen, das Expertenwissen weiter zu teilen und weiter zu entwickeln. Hierfür wird neben dem digitalen Wissensmanagement auch das analoge Wissensmanagement benötigt, wie beispielsweise Workshops, Schulungen oder persönliche Gespräche. Für ein vollumfängliches Wissensmanagement muss eine Balance zwischen digitalem und analogem Wissensmanagement gefunden werden.⁷⁴⁹

5.3.2 Identifikation der relevanten Wissensinkremente

Für die erfolgreiche Umsetzung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse ist ein den Werkzeuglebenszyklus übergreifendes Wissensmanagement essentiell. Nur wenn Erkenntnisse, die von einer Partei zu einem spezifischen Zeitpunkt über den Werkzeuglebenszyklus gewonnen werden, einer anderen Partei zu einem anderen Zeitpunkt anwendungsfall- und adressatenorientiert bereitgestellt werden können, ist sichergestellt, dass Optimierungspotenziale zeitnah und nachhaltig umgesetzt und Kosteneinsparungen realisiert werden können. Dazu ist ein Austausch von Daten, Informationen und Wissen zur Werkzeugerstellung, Werknutzung und Werkzeugverschrottung sowohl innerbetrieblich als auch zwischen Werkzeugbaubetrieben und ihren Kunden, den Serienproduzenten, notwendig. Für die dazu notwendige Identifikation der relevanten Wissensinkremente sind zwei Schritte durchzuführen. Zunächst sind die Wissensziele der unterschiedlichen Interessensgruppen in Bezug auf die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse klar zu definieren. Anschließend erfolgt

⁷⁴⁷ Vgl. Kern; Müller (Digitales Wissensmanagement oder die Frage: Kann Wissen online gemanagt werden?), 2020, S. 7-9.

⁷⁴⁸ Vgl. Kern; Müller (Digitales Wissensmanagement oder die Frage: Kann Wissen online gemanagt werden?), 2020, S. 11-18.

⁷⁴⁹ Vgl. Kern; Müller (Digitales Wissensmanagement oder die Frage: Kann Wissen online gemanagt werden?), 2020, S. 13-17.

die Ableitung der relevanten Wissenskategorien. Die zwei Schritte sind in der nachfolgenden Abbildung 150 dargestellt und werden im weiteren Verlauf erläutert.

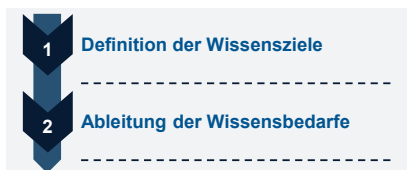


Abbildung 150: Vorgehen zur Identifikation der relevanten Wissensinkremente⁷⁵⁰

Definition der Wissensziele

Das Ziel einer wissensorientierten Unternehmensführung sollte nach NORTH darin bestehen, aus Informationen Wissen zu generieren und dieses Wissen in nachhaltige Wettbewerbsvorteile umzusetzen, die langfristig als Geschäftserfolge sichtbar werden.⁷⁵¹ Die dazu definierten Wissensziele sollten nach PROBST ET AL in normative, strategische und operative Wissensziele differenziert werden.⁷⁵² Normative Wissensziele betreffen die Schaffung einer wissensbewussten Unternehmenskultur, während die strategischen Wissensziele darauf abzielen, den zukünftigen Kompetenzbedarf des Unternehmens anhand des Kernwissens zu definieren. Operative Wissensziele, welche die normativen und strategischen Zielvorgaben konkretisieren, dienen zur Umsetzung des Wissensmanagements. Das Erreichen der normativen, strategischen und operativen Zielvorgaben wird durch die Wissensbewertung überprüft. Die durch das Wissensmanagement verursachte Ressourcenbelegung wird durch einen Wirksamkeitsnachweis gerechtfertigt. Außerdem können durch diesen Prozess Kurskorrekturen bei der Durchführung von Wissensmanagementprojekten vorgenommen werden.⁷⁵³

Die Definition der Wissensziele im Anwendungskontext baut auf den zuvor definierten Zielen der Werkzeuglebenszykluskostenanalyse auf. Eine Abgrenzung bzw. Ergänzung der Ziele liegt darin, dass Wissensziele nicht auf die datenbasierte Optimierung des Werkzeugeinsatzes sowie die datenbasierte Reduzierung der Werkzeugkosten fokussiert sind, sondern übergeordnet auf die Generierung von Wissen aus Informationen abzielen, um daraus langfristig einen messbaren Geschäftserfolg zu generieren. Im Anwendungskontext bedeutet dies, dass die Wissensziele auf die Ziele der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse aufbauen, um werkzeuglebenszyklus- und stakeholderübergreifend auf Basis der gesammelten Daten und Informationen Wissen zu generieren. Mithilfe des generierten Wissens sollen langfristig messbare Geschäftserfolge erzielt werden.⁷⁵⁴ Für eine zielgerichtete Definition der Wissensziele im Kontext der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse eignen sich die

⁷⁵⁰ Eigene Darstellung

⁷⁵¹ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 35.

⁷⁵² Vgl. Kapitel 5.3.1

⁷⁵³ Vgl. Probst et al. (Wissen managen), 2012, S. 31-34.

⁷⁵⁴ Vgl. Kapitel 2.1.5

in der nachfolgend dargestellten Abbildung 151 angeführten Leitfragen in Anlehnung an NORTH.⁷⁵⁵

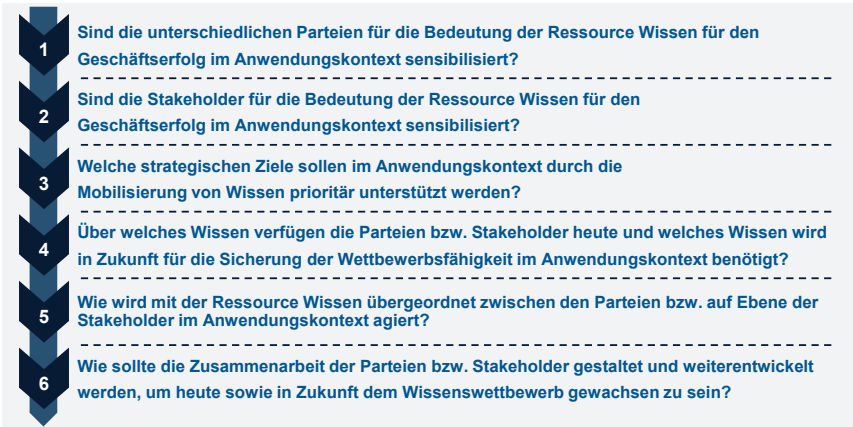


Abbildung 151: Leitfragen zur Definition von Wissenszielen⁷⁵⁶

Die Definition der Wissensziele aus der Perspektive des Werkzeugbaus und der Serienproduktion geben einen Rahmen vor, welche Ziele mit der Einführung eines ganzheitlichen Wissensmanagements entlang des Werkzeuglebenszyklus erreicht werden sollen. Dazu sollten die definierten Wissensziele den SMART-Kriterien genügen, um sicherzustellen, dass sie spezifisch, messbar, attraktiv, realistisch und terminiert formuliert sind.⁷⁵⁷

Mithilfe einer klaren Zieldefinition ist es möglich, den Erfolg des ganzheitlichen Wissensmanagements messbar und bewertbar zu beeinflussen. Darüber hinaus wird durch die gemeinsame Zieldefinition die Motivation des Projektteams gesteigert.⁷⁵⁸ In Abbildung 152 ist ein Beispiel für die Wissensziele im Anwendungskontext dargestellt. Das Beispiel wird im weiteren Verlauf erläutert und detailliert.

Wissensziele		
	Normativ:	Schaffung und Etablierung einer bereichsübergreifenden Kultur des Knowledge Sharings entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus
	Strategisch:	Nutzerfreundliche Dokumentation und bedarfsgerechter Abruf von werkzeuglebenszyklusbezogenem Wissen im Anwendungskontext
	Operativ:	Einführung einer digitalen, bereichsübergreifenden Wissensplattform entlang des Werkzeuglebenszyklus für alle relevanten Stakeholder

Abbildung 152: Beispiele für Wissensziele im Anwendungskontext⁷⁵⁹

⁷⁵⁵ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 244.

⁷⁵⁶ Eigene Darstellung

⁷⁵⁷ Vgl. Alam; Gühl (Projektmanagement für die Praxis), 2020, S. 74.

⁷⁵⁸ Vgl. Alam; Gühl (Projektmanagement für die Praxis), 2020, S. 72.

⁷⁵⁹ Eigene Darstellung

Ableitung der Wissensbedarfe

Auf Basis der definierten Wissensziele erfolgt im zweiten Schritt die Ableitung der Wissensbedarfe. Dazu wird zunächst ermittelt, welches Wissen von den verschiedenen Stakeholdern entlang des Werkzeuglebenszyklus benötigt wird, um die zuvor definierten Ziele der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse zu erfüllen. Abschließend wird der Wissensbedarf mit dem zur Verfügung stehenden Wissensangebot verglichen und die Wissenslücke abgeleitet. Für ein besseres Verständnis sind in Abbildung 153 und Abbildung 154 nach SCHUH verschiedene Wissensarten entlang des Werkzeugherstellungsprozesses abgebildet.⁷⁶⁰

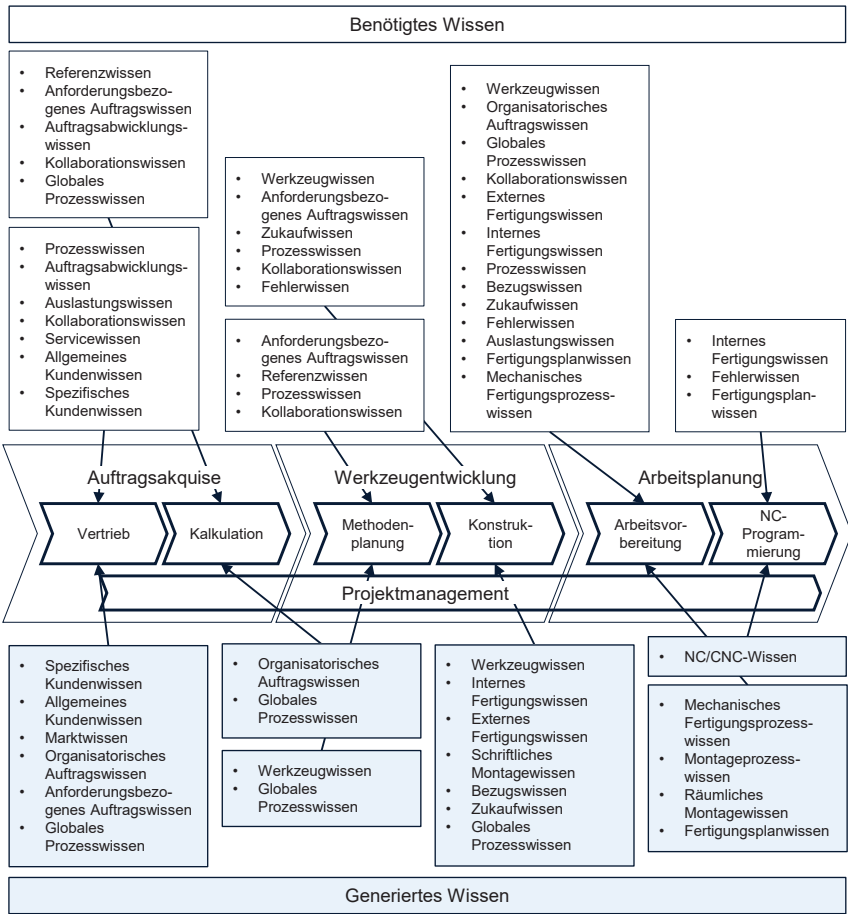


Abbildung 153: Wissensarten entlang der Prozesskette des Werkzeugbaus Teil I⁷⁶¹

⁷⁶⁰ Vgl. Schuh (Prozessmodell zum systematischen Wissenstransfer im Werkzeugbau), 2020, S. 9.

⁷⁶¹ Vgl. Schuh (Prozessmodell zum systematischen Wissenstransfer im Werkzeugbau), 2020, S. 20.

Die Wissensarten sind dabei in die beiden Kategorien benötigtes und generiertes Wissen unterteilt. In Abbildung 153 ist der erste Teil der Wissenskategorien bis einschließlich dem Prozessschritt der Arbeitsplanung dargestellt.⁷⁶² In der Abbildung 154 ist der zweite Teil der Wissenskategorien für die Prozessschritte der Werkzeugproduktion sowie der Serienbetreuung abgebildet.⁷⁶³

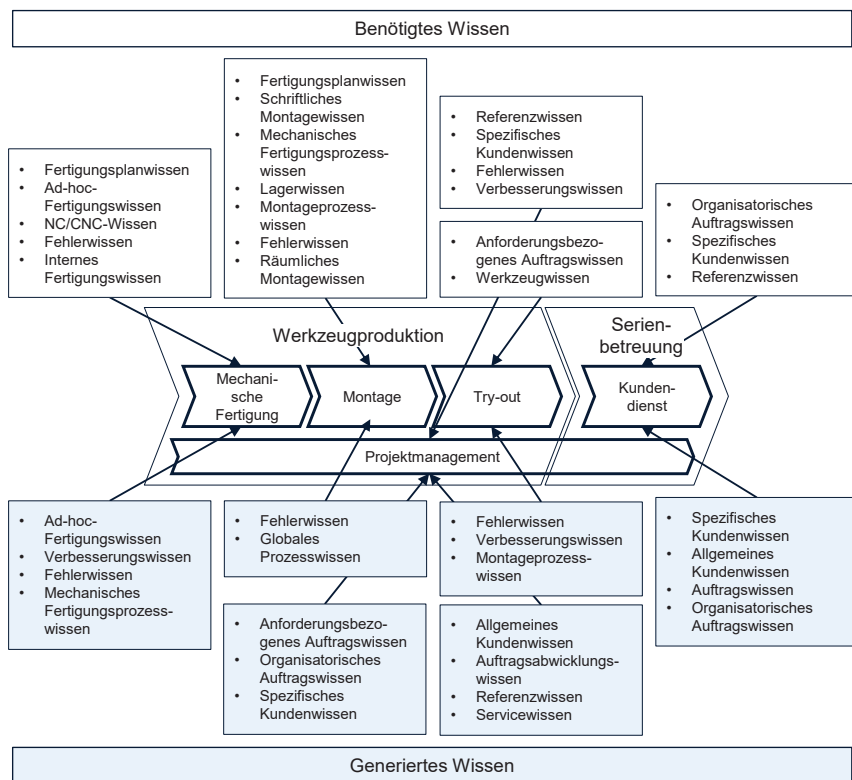


Abbildung 154: Wissensarten entlang der Prozesskette des Werkzeugbaus Teil II⁷⁶⁴

Die dargestellten Beispiele dienen als Orientierung für die Werkzeugherstellung. Je nach Unternehmensgröße und -ausrichtung kann es noch weitere Wissensarten geben, die zunächst erarbeitet werden müssen. Für den Fall, dass die Identifizierung der Wissensarten sich als kompliziert oder langwierig herausstellen sollte, können die in Kapitel 5.2.1.2 aufgenommenen Prozessschritte zur Aufnahme der Werkzeugdaten und -kosten entlang des Werkzeuglebenszyklus als Hilfestellung genutzt werden. Nachdem alle Wissensarten entlang des ge-

⁷⁶² Vgl. Schuh (Prozessmodell zum systematischen Wissenstransfer im Werkzeugbau), 2020, S. 9.

⁷⁶³ Vgl. Schuh (Prozessmodell zum systematischen Wissenstransfer im Werkzeugbau), 2020, S. 9.

⁷⁶⁴ Vgl. Schuh (Prozessmodell zum systematischen Wissenstransfer im Werkzeugbau), 2020, S. 20.

samen Werkzeuglebenszyklus identifiziert worden sind, können die im Anwendungszusammenhang relevanten Wissensarten auf Basis der zuvor definierten Wissensziele abgeleitet werden. Abschließend werden die als relevant erachteten Wissensarten mit dem bereits bestehenden Wissensangebot abgeglichen, um die bestehende Wissenslücke zu identifizieren und zu dokumentieren. Die Identifizierung der relevanten Wissensinkremente ist damit abgeschlossen.

5.3.3 Verknüpfung der Wissensinkremente mit der Werkzeuginstanz

Die Verknüpfung der Wissensinkremente mit der dazugehörigen Werkzeuginstanz ist die Voraussetzung für ein systematisches Wissensmanagement. Nur wenn die einzelnen Wissensinkremente verursachungsgerecht bzw. adressatengerecht einzelnen Werkzeuginstanzen im Wissensmanagement zugewiesen werden können, kann systemseitig eine aufwandsarme Wissensaufnahme und -abgabe umgesetzt werden. Im Werkzeugbau entsteht aufgrund des Projektcharakters implizites und explizites Wissen zunächst immer projektbezogen. Im zweiten Schritt kann dieses Projektwissen durch Verallgemeinerung in explizites Wissen überführt und nutzbar gemacht werden. Die Verknüpfung der Wissensinkremente mit der dazugehörigen Werkzeuginstanz ist entsprechend insbesondere für das projektbezogene Wissen relevant.

Wissensverknüpfung auf Typ- und Instanzebene

Wie in Kapitel 5.2.1.4 erläutert, ist die Verknüpfung der Werkzeugkomponenten-ID mit der Auftragsnummer des Werkzeugherstellungsauftrags während der Werkzeugherstellungsphase oder mit der Auftragsnummer des Serienproduktionsauftrags während der Werkzeugnutzungsphase essentiell, um Daten, Informationen und Wissen verursachungsgerecht der Werkzeugkomponenteninstanz sowie dem Werkzeugherstellungsauftrag bzw. dem Serienproduktionsauftrag zuordnen zu können. Abhängig vom Anwendungsfall, den Rahmenbedingungen sowie den Wissensarten kann die Verknüpfung auf Komplettwerkzeugebene, Baugruppenebene oder auf Werkzeugkomponentenebene erfolgen. Für ein besseres Verständnis wird auf Abbildung 85 in 5.1.2 verwiesen.

Darüber hinaus wird zwischen der Typ- und der Instanzebene unterschieden. Auf der Typenebene können allgemeingültige Erkenntnisse für einen Komplettwerkzeugtyp, einen Werkzeugbaugruppentyp oder einen Werkzeugkomponententyp gespeichert werden. Auf der Instanzebene können für alle drei erwähnten Ebenen spezifische Erkenntnisse, die individuell für die jeweilige Instanz relevant sind, abgespeichert werden. Die Unterschiede zwischen Typ und Instanz in Bezug auf das Thema Wissensmanagement sind anhand eines Beispiels auf der Werkzeugkomponentenebene in der nachfolgenden Abbildung 155 dargestellt.



Abbildung 155: Wissensverknüpfung auf Typ- und Instanzebene⁷⁶⁵

Eine sinnvolle Aufnahme, Verknüpfung, Auswertung und Externalisierung des projektbezogenen Wissens ist abhängig vom Anwendungsfall sowie der Wissensart auf Komplettwerkzeugebene, Baugruppenebene oder auf Werkzeugkomponentenebene möglich. Allgemeingültige Erkenntnisse können auf der Typebene, spezifische Erkenntnisse auf der Instanzebene verknüpft werden. Für ein Übergreifendes Wissensmanagement ist ein Austausch von Wissen über den gesamten Werkzeuglebenszyklus sowohl innerbetrieblich als auch zwischen Werkzeugbaubetrieben und ihren Kunden, den Serienproduzenten, sinnvoll. Im Kontext der digitalen Vernetzung erfolgt der Austausch von Daten, Informationen und Wissen innerhalb der Organisation als auch zwischen Werkzeugbaubetrieben und ihren Kunden idealerweise plattformbasiert.⁷⁶⁶ Im weiteren Verlauf wird auf die konstituierenden Merkmale einer solchen digitalen Plattform eingegangen.

Digitale Wissensplattform

Der allgemeinen Definition folgend, lässt sich eine „Plattform“ als „einheitliche Basis“ beschreiben, die bei der Strukturierung, dem Verständnis, der Entwicklung und der Nutzung von Ge-

⁷⁶⁵ Eigene Darstellung
⁷⁶⁶ Vgl. Boos et al. (Corporate Tooling), 2022, S. 21.

schaftsprozessen, Geschäftsmodellen und Produkten für unterschiedlichste Anwendungsgebiete hilft.⁷⁶⁷ Dabei kann die Plattform als Zusammenschluss verschiedener Funktionen und Anwendungen unter einer Zugangsseite beschrieben werden. Die Zugangsseite ist über einen zentralen Einstiegspunkt erreichbar.⁷⁶⁸

Es gibt zahlreiche Varianten von digitalen Plattformen. Generell werden zwei Varianten unterschieden: Transaktionszentrierte und datenzentrierte digitale Plattformen. Nach ENGELHARDT ET AL. sind beide Arten zwar nicht in jedem Fall eindeutig trennbar, unterscheiden sich in den meisten Elementen jedoch deutlich voneinander. Im Zentrum von transaktionszentrierten Plattformen steht die Vermittlung von Angebot und Nachfrage. Als digitaler Marktplatz ermöglicht die Plattform Transaktionen zwischen dem Anbieter und den Kunden. Des Weiteren bietet die Plattform einen Angebotsmechanismus sowie eine Informations- und Suchfunktion.⁷⁶⁹ Bei datenzentrierten Plattformen stehen hingegen die Erfassung, Aufbereitung, Auswertung und Nutzung von Datenströmen im Fokus. Durch die datenbasierte Vernetzung entsteht eine Art digitales Ökosystem, wobei die im Regelfall offene oder halboffene Plattform die entsprechende Anwendersoftware zur Verfügung stellt. Offen bedeutet in diesem Fall, dass jeder Akteur Zugriff auf alle Daten hat. Bei halboffenen Plattformen stehen die Daten und Informationen nur dem Plattformeigentümer vollständig zur Verfügung. Andere Akteure haben nur einen eingeschränkten Zugriff.⁷⁷⁰

Zunehmend an Bedeutung gewinnen digitale Plattformen vor allem auch im industriellen Bereich.⁷⁷¹ Plattformen werden im Zuge der Digitalisierung eine zentrale Schnittstelle für neue Kunden-Anbieter-Konstellationen im Bereich der Produktion sein. Digital vernetzte Geschäftsprozesse lassen Spielraum für neue Geschäftsmodelle. Die Rolle von digitalen Plattformen ist das Verknüpfen der verschiedenen Akteure, wobei ein gegenseitiger Nutzen angestrebt wird, der auf dem gemeinsamen transparenten Netzwerk basiert.⁷⁷² Im Bereich der Industrie und der industrienahen Dienstleistungen verwenden bereits rund 70 % der Unternehmen Plattformen, wobei die jeweilige digitale Reife des Unternehmens Hand in Hand mit der Plattformnutzung geht. Je weiter die Digitalisierung vorangeschritten ist, desto wahrscheinlicher ist der Einsatz digitaler Plattformen.⁷⁷³

Die deutsche Industrie ist geprägt von linearen Wertschöpfungsketten. PARKER ET AL. sprechen in dem Zusammenhang von „Pipeline“-Unternehmen, die wie ein typisches Input-Output-Modell aufgebaut sind. Rohstoffe werden in ein höherwertiges Endprodukt umgewandelt und an den Kunden veräußert.⁷⁷⁴ Digitale Plattformen können solche linearen Strukturen aufbrechen und die Transformation zu komplexen, hochvernetzten, digitalen Plattform-Ökosystemen einleiten.⁷⁷⁵ Eine digitale Plattform ist ein Informationssystem, auch Soziotechnisches- oder

⁷⁶⁷ Vgl. Knoll; Rinderle-Ma (Plattformen – Eine Einführung), 2015, S. 323.

⁷⁶⁸ Vgl. Bauer (Architekturen für Web-Anwendungen), 2008, S. 168.

⁷⁶⁹ Vgl. Engelhardt et al. (Eigenschaften und Erfolgsfaktoren digitaler Plattformen), 2017, S. 5-6.

⁷⁷⁰ Vgl. Lichtblau (Plattformen - Infrastruktur der Digitalisierung), 2019, S. 12.

⁷⁷¹ Vgl. Lichtblau (Plattformen - Infrastruktur der Digitalisierung), 2019, S. 1.

⁷⁷² Vgl. Engelhardt et al. (Eigenschaften und Erfolgsfaktoren digitaler Plattformen), 2017, S. 5.

⁷⁷³ Vgl. Lichtblau (Plattformen - Infrastruktur der Digitalisierung), 2019, S. 1.

⁷⁷⁴ Vgl. Parker et al. (Die Plattform-Revolution), 2017, S. 18.

⁷⁷⁵ Vgl. Jaekel (Die Macht der digitalen Plattformen), 2017, S. 48.

Mensch-Maschine-System genannt, da es zur Bereitstellung von Informationen und Kommunikation nach wirtschaftlichen Kriterien eingesetzt wird und sowohl menschliche als auch maschinelle Teilsysteme enthält.⁷⁷⁶ Informationssysteme lassen sich mittels verschiedener, auf dem Markt existierender Rahmenwerke beschreiben.⁷⁷⁷

Für die Erläuterung der digitalen Wissensplattform wird das Modell Architektur integrierter Informationssysteme (ARIS) nach SCHEER verwendet. Das ARIS-Modell ist ein Rahmenwerk und eine Methode zur Abbildung und Optimierung von Geschäftsprozessen. Das Modell führt fünf Sichtweisen ein, die die Komplexität des Prozessmodells verringern sollen.⁷⁷⁸ Des Weiteren werden durch die verschiedenen Perspektiven Redundanzen vermieden.⁷⁷⁹

Vorgänge bzw. Funktionen oder Tätigkeiten, die Input-Leistungen zu Output-Leistungen transformieren, werden durch die Funktionssicht des ARIS-Modells beschrieben. Darunter fallen ebenfalls Unternehmensziele, da Funktionen Ziele unterstützen. Computergestützte Bearbeitungsregeln einer Funktion werden in Anwendungssoftware definiert. Das Dach des ARIS-Hauses bildet die Organisationssicht, welche den Fokus auf die Aufbauorganisation setzt. Diese beinhaltet alle Organisationseinheiten bzw. Ressourcen wie Mitarbeitende, Maschinen oder Hardware und beschreibt deren Aufgaben sowie deren Beziehung zueinander. Eine weitere Perspektive des ARIS-Modells ist die Datensicht, die sämtliche Informationsobjekte beschreibt, die für das Unternehmen relevant sind. Umfelddaten der Vorgangsbearbeitung wie Produktionsdaten, schriftliche Dokumente und weitere Ereignisse gehören dazu. SCHEER spricht außerdem von Nachrichten, die Funktionen erzeugen bzw. von Funktionen ausgelöst werden. Die Leistungssicht beinhaltet alle materiellen und immateriellen Input- und Output-Leistungen inklusive finanziellen Leistungen und bildet das Fundament des ARIS-Hauses. Die vierte Sicht des von SCHEER entwickelten Rahmenwerks ist die Steuerungs- bzw. Prozesssicht. Diese Sichtweise verknüpft alle schon aufgeführten Sichtweisen und bildet so den Rahmen für eine gesamte Prozessbeschreibung. Die Sichten werden in einen logischen und zeitlichen Ablaufplan integriert.⁷⁸⁰ Innerhalb der fünf Sichten werden jeweils drei Vorgehensmodelle unterschieden, die die Komplexität reduzieren sollen. Die einzelnen Sichten des Anwendungssystems werden im Fachkonzept detailliert dargestellt. Im Datenverarbeitungskonzept geht es tiefergehend um die Anpassung der Fachmodelle an IT-Schnittstellen. Die dritte Stufe Implementierung setzt die Anforderungen an Programme konkreter Produkte der Informationstechnik um.⁷⁸¹

Eine digitale Wissensplattform als Grundlage für ein Übergreifendes Wissensmanagement hat die Zielsetzung, allen Stakeholdern entlang des Werkzeuglebenszyklus die Möglichkeit zu ge-

⁷⁷⁶ Vgl. Krcmar (Einführung in das Informationsmanagement), 2015, S. 8.

⁷⁷⁷ Vgl. Matthes (Enterprise Architecture Frameworks Kompendium), 2011, S. 17.

⁷⁷⁸ Vgl. Matthes (Enterprise Architecture Frameworks Kompendium), 2011, S. 44.; Vgl. Pongratz et al. (Prozessorientierte Wirtschaftsdidaktik und Einsatz von ERP-Systemen), 2009, S. 32.

⁷⁷⁹ Vgl. Scheer (ARIS Vom Geschäftsprozess zum Anwendungssystem), 2002, S. 33.

⁷⁸⁰ Vgl. Matthes (Enterprise Architecture Frameworks Kompendium), 2011, S. 73-74.; Vgl. Pongratz et al. (Prozessorientierte Wirtschaftsdidaktik und Einsatz von ERP-Systemen), 2009, S. 32-33.; Vgl. Scheer (ARIS Vom Geschäftsprozess zum Anwendungssystem), 2002, S. 36.

⁷⁸¹ Vgl. Krcmar (Einführung in das Informationsmanagement), 2015, S. 54.

ben, Wissen bedarfsgerecht abzurufen und nutzerfreundlich zu dokumentieren. Bei der zu entwickelnden digitalen Plattform stehen die Erfassung, Aufbereitung, Auswertung und Nutzung von Datenströmen im Fokus. Es handelt sich somit um eine datenzentrierte Plattform. Da es sich bei digitalen Plattformen entsprechend der zuvor angeführten Definition um ein Informationssystem handelt, wird die digitale Wissensplattform anhand des zuvor vorgestellten ARIS-Modells nach SCHEER entwickelt. Mithilfe der fünf Sichten des ARIS-Modells kann die Konzeption des Gestaltungselements wissenschaftlich fundiert strukturiert werden. Die Entwicklung der einzelnen Gestaltungsaspekte erfolgt ganzheitlich und es bleiben weder relevante Elemente des Systems unberücksichtigt noch werden irrelevante Elemente betrachtet. Im Zuge dieser Arbeit werden die Sichten auf der Fachkonzeptebene beschrieben. Im Folgenden werden zunächst die Organisations- und Datensicht erläutert, im nächsten Unterkapitel folgen die Funktions- und Prozesssicht. Auf die Leistungssicht wird an dieser Stelle verzichtet, da die digitale Wissensplattform für ein Übergreifendes Wissensmanagement eingesetzt werden soll. Die Betrachtung und Ausgestaltung eines zugrundeliegenden Geschäftsmodells ist nicht Teil dieser Art, aber durchaus ein interessantes und beachtenswertes Forschungsfeld.

Organisationssicht

Das Dach des ARIS-Modells bildet die Organisationssicht, die den Fokus auf die Aufbauorganisation setzt. Diese wird mittels eines Organigramms dargestellt. Die in der Aufbauorganisation dargestellten Objekte sind Organisationseinheiten, die Funktionen bearbeiten. Die Funktionen tragen zum Erreichen der Ziele des Unternehmens bei.⁷⁸² Im Kontext einer digitalen Wissensplattform für ein Übergreifendes Wissensmanagement sind die relevanten Stakeholder der Werkzeugbau und die Serienproduktion inklusive der verschiedenen Abteilungen und darunterliegenden Benutzer, die entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus Wissen abrufen oder bereitstellen. In der nachfolgenden Abbildung 156 ist beispielhaft eine entsprechende Organisationssicht bis auf Abteilungsebene dargestellt. Je nach Unternehmen, Anwendungsfall und definierter Zielsetzung fällt die Organisationssicht anders aus.

⁷⁸² Vgl. Seidlmeier (Prozessmodellierung mit ARIS), 2015, S. 25.

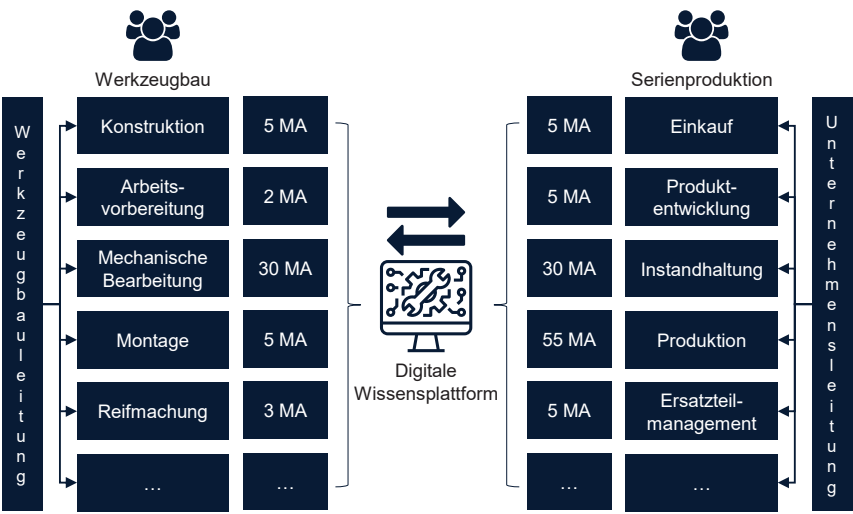


Abbildung 156: Digitale Wissensplattform - Organisationssicht⁷⁸³

Datensicht

Die Datensicht entspricht grundsätzlich der in Kapitel 5.1 entwickelten Digitalen Werkzeugakte. Wie zuvor beschrieben, liegt der Fokus jedoch auf einer nutzerfreundlichen Externalisierung und Abspeicherung sowie einem bedarfsgerechten Abruf von Wissen. Wohingegen die Digitale Werkzeugakte primär ein Daten- und Informationsspeicher ist. Die zugrundeliegende Datenstruktur ist jedoch identisch und wird daher an dieser Stelle nicht wiederholt.

Insbesondere bei einem werkzeuglebenszyklusübergreifenden Wissensmanagement ist ein Rollen- und Rechtesystem notwendig, um den Zugriff für die unterschiedlichen Rollen, Organisationseinheiten und Unternehmen definieren und somit Anforderungen an den Daten- und Know-how-Schutz erfüllen zu können. Die Verwaltung der Lese-, Schreib- und Bearbeitungsrechte je System-User erfolgt dazu durch einen Systemadministrator. Für die Rollenverteilung ergeben sich zwei Möglichkeiten. Zum einen wird jeder Anwendende als eine spezifische Rolle gesehen und erhält seiner Funktion- und Tätigkeitsbeschreibung entsprechend die notwendigen Schreib- und Leserechte auf das Wissensmanagementsystem.

Dem gegenüber steht die Philosophie, dass einmalig standardisierte Rollenprofile mit den entsprechenden Schreib- und Leserechten für das Wissensmanagementsystem entlang des Werkzeuglebenszyklus definiert werden. Den Anwendenden werden im zweiten Schritt je nach Funktions- und Tätigkeitsbeschreibung eine oder auch mehrere Rollenprofile zugewiesen. Die Vorteile der zweiten Option bestehen darin, dass die Rollenprofile standardisiert und notwendige Änderungen beispielsweise an den Schreib- und Leserechten nur an dem entsprechen-

⁷⁸³ Eigene Darstellung

den Rollenprofil und nicht für jeden Anwendenden einzeln durchgeführt werden müssen. Zudem können die genannten Rollenprofile um Kenntnisstände, z. B. der Stufen eins bis drei, ergänzt und mit einem konkreten Weiterbildungspfad für die Aneignung eines höheren Kenntnisstands verknüpft werden.

Damit ist im System der aktuelle Wissensstand des Anwendenden für ein spezifisches Rollenprofil bekannt und kann nicht nur für das Management der Lese- und Schreibrechte, sondern auch für eine bedarfsgerechte Wissensbereitstellung und eine nutzerfreundliche Wissensdokumentation genutzt werden. Die Definition der standardisierten Rollenprofile geschieht unternehmensindividuell und sollte auf der einen Seite so konkret wie möglich und auf der anderen Seite so generisch wie möglich sein, um die Anzahl an Rollenprofilen und damit die Handhabung des Wissensmanagementsystems praktikabel zu halten. In der nachfolgenden Abbildung 157 sind beispielhaft zwei standardisierte Rollenprofile zur Umsetzung des Rollen- und Rechtemanagements dargestellt.



Abbildung 157: Beispiele für standardisierte Rollenprofile inkl. Rechtemanagement⁷⁸⁴

Nachdem die Organisations- und Datensicht der digitalen Wissensplattform vorgestellt worden sind, folgt im nächsten Unterkapitel die Prozess- und Funktionssicht entsprechend des ARIS-Modells. Konkret wird die nutzerfreundliche Dokumentation und Externalisierung von Projektwissen sowie der bedarfsgerechte Wissensabruf vorgestellt.

5.3.4 Nutzerfreundliche Dokumentation und bedarfsgerechter Wissensabruf

Nutzerfreundliche Dokumentation von Projektwissen

An dieser Stelle wird der Fokus auf das Projektwissen gelegt, da für das Projektwissen eine unmittelbare Externalisierung, z. B. durch die direkte Abspeicherung im Wissensmanagementsystem, aufgrund des hohen Aufwands und der geringen Nutzerfreundlichkeit nicht umsetzbar ist. Ein Großteil des Projektwissens kann jedoch mit Hilfe geeigneter Methoden zu einem expliziten, projektübergreifenden Wissensangebot transformiert werden. Nachfolgend wird zunächst der Prozess und die Funktionen zur Sozialisation von Projektwissen und anschließend

⁷⁸⁴ Eigene Darstellung

der Prozess und die Funktionen zur Transformation des Projektwissens vorgestellt. Die beiden Aspekte sind in der nachfolgenden Abbildung 158 dargestellt.



Abbildung 158: Aspekte einer nutzerfreundlichen Wissensdokumentation⁷⁸⁵

Prozess und Funktionen zur Sozialisation von Projektwissen

Innerhalb der Projektbearbeitung bieten sich aufgrund der begrenzten Ressource Zeit zur Wissenssicherung die Methoden der Sozialisation an. Dazu gehören Gruppenarbeiten, Job Rotation und Job-Enlargement. Job Rotation bezeichnet einen systematischen Arbeitsplatzwechsel zwischen Mitarbeitenden aus unterschiedlichen Arbeitsbereichen. Job Enlargement steht für die quantitative Erweiterung von Aufgaben eines Mitarbeitenden in Bezug auf die Vielfalt der durchzuführenden Tätigkeiten, während beim Job Enrichment die Aufgaben qualitativ in Bezug auf den Entscheidungs- und Kontrollspielraum erweitert werden.⁷⁸⁶

Essentiell für die Nutzung von Methoden der Sozialisation ist das Wissen darüber, welcher Mitarbeitende über welches Expertenwissen verfügt, um durch die geschickte Kombination von Mitarbeitenden mit verschiedenen Kenntnisständen systematisch die Sozialisation des Wissens zu ermöglichen. Dazu eignet sich der Aufbau eines Expertenverzeichnisses, in dem definiert ist, welcher Mitarbeitende über welches Expertenwissen verfügt. Basierend auf dem für ein Projekt benötigten expliziten Wissen und den zur Verfügung stehenden Wissensträgern kann die Projektbesetzung anforderungsgerecht durchgeführt werden. Das Ergebnis ist, dass das Projekt bedarfsgerecht besetzt ist und die Methoden der Sozialisation effizient eingesetzt werden können.

Darüber hinaus sollte die Sicherung des Projektwissens durch geeignete Methoden unterstützt werden. Eine Möglichkeit für die Dokumentation des Projektwissens ist der Maßnahmenplan. Im Maßnahmenplan werden projektspezifisch aufgetretene Probleme, zugrundeliegende Ursachen und konkrete Maßnahmen definiert. Die Maßnahmen werden ergänzt um eine verantwortliche Person sowie eine Deadline. Bei vielen offenen Maßnahmen kann es zudem sinnvoll sein, eine Priorisierung der Maßnahmen vorzunehmen. Sobald eine Maßnahme abgeschlossen worden ist, wird das Ergebnis und der Erfolg der Maßnahme dokumentiert. In Abhängigkeit von der Maßnahme erfolgt die Verknüpfung im Wissensmanagementsystem auf der Komponenten-, Baugruppen- oder Komplettwerkzeugebene und bezogen auf die Spezifität auf der Typebene, vorausgesetzt, dass das Problem für diesen Typen generischer Natur ist.⁷⁸⁷

⁷⁸⁵ Eigene Darstellung

⁷⁸⁶ Vgl. Reinmann-Rothmeier (Wissensmanagement lernen), 2001, S. 119-123.

⁷⁸⁷ Vgl. Voigt; Garrel (Erfahrungssicherungsworkshops), 2016, S. 118.

Prozess und Funktionen zur Transformation von Projektwissen

Für die Transformation des impliziten Projektwissens zu einem expliziten, projektübergreifenden Wissensangebot gibt es zum einen verschiedene Zeitpunkte und zum anderen verschiedene Methoden, die berücksichtigt werden sollten. Als Zeitpunkte für die Transformation des Projektwissens kommen während der Werkzeugherstellungsphase große Meilensteine, wie z. B. der Abschluss der Konstruktionsphase oder spätestens der Zeitpunkt der Werkzeugübergabe an die Serienproduktion in Frage. Während der Werkzeugnutzungsphase bis zum Ende der ersten Lebensphase des Werkzeugs bieten sich Zeitpunkte an, bei denen die Werkzeugperformance und ggf. notwendige Anpassungen bzw. Weiterentwicklungen des Werkzeugs oder einzelner Verschleißteile des Werkzeugs besprochen werden.

Die Erhebung des impliziten Projektwissens während der erwähnten Zeitpunkte kann mithilfe der Unterstützung verschiedener Methoden erfolgen. Im Anwendungszusammenhang bieten sich insbesondere die Methoden Storytelling, Lessons Learned, und Debriefing an. Storytelling stellt insbesondere den handelnden Menschen in den Mittelpunkt von Projekten und Prozessen. Im Rahmen der sechs Schritte Planen, Interviewen, Extrahieren, Schreiben, Validieren und Verbreiten wird das implizite Projektwissen dokumentiert.⁷⁸⁸ Für detaillierte Informationen zur Methode des Storytellings wird an dieser Stelle auf THIER⁷⁸⁹ verwiesen. Mithilfe von Lessons-Learned-Berichten wird über den Projektverlauf entstandenes Wissen dokumentiert und damit in die Organisation überführt. Das konsequente Auseinandersetzen mit vergangenen Fehlern und Erfolgen am Ende eines Projekts und die anschließende formlose Dokumentation unterstützt andere Teams im Unternehmen dabei, von getätigten Erfahrungen teamübergreifend zu partizipieren.⁷⁹⁰ Eine weitere Methode ist das Debriefing. Im Gegensatz zu den Lessons-Learned-Berichten wird das Erfahrungswissen durch einen geschulten Dritten erfasst. Debriefings eignen sich aufgrund der besonderen Schulung und Neutralität des Interviewenden bei herausfordernden Projekten sowie bei schwierigen und konfliktgeladenen Themen.⁷⁹¹

Zur Unterstützung bei der Auswahl einer bedarfsgerechten Methode zur Erhebung des Projektwissens werden die vorgestellten Methoden auf Basis der zuvor getätigten Beschreibung nach THIER und NORTH qualitativ nach Aufwand und Nutzen bewertet. Für die Bewertung des Aufwands einer Methode ist die Teilnehmendenanzahl sowie die Dauer ausschlaggebend. Für die Bewertung des Nutzens ist die Menge und Qualität des Wissens von Bedeutung. Den geringsten Aufwand, aber auch den geringsten Nutzen hat die Methode Lessons Learned. Sie bietet sich daher insbesondere für die optionale Wissenstransformation während der Werkzeugherstellung an, z. B. wenn eine schwierige Projektsituation im Werkzeugbau das erste Mal erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Die Methode Debriefing ist bezogen auf den Aufwand höher zu bewerten, da für die Moderation ein geschulter Interviewer benötigt wird. Durch

⁷⁸⁸ Vgl. Thier (Storytelling), 2017, S. 2-3.

⁷⁸⁹ Vgl. Thier (Storytelling), 2017.

⁷⁹⁰ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 281-282.

⁷⁹¹ Vgl. North (Wissensorientierte Unternehmensführung), 2021, S. 283.

die Neutralität und Erfahrung des Interviewenden ist aber auch der Nutzen dieser Methode höher zu bewerten. Diese Methode eignet sich insbesondere für die Erfahrungssicherung an größeren Meilensteinen, wie z. B. der Werkzeugübergabe in die Serienproduktion oder am Ende der ersten Lebensphase des Werkzeugs. Die Methode Storytelling benötigt den höchsten Aufwand, bietet aber auch den größten Nutzen. Diese Methode sollte vorzugsweise eingesetzt werden, wenn in der Serienproduktion mit dem Werkzeug, an der verschiedene Parteien beteiligt sind, größere bis große Probleme mit dem Werkzeug auftreten. Mithilfe der Methode des Storytellings kann aus der Perspektive einzelner Beteiligter das Geschehen aufbereitet und ein Werkzeugschaden insofern nachvollzogen werden, dass die Ursache für den Werkzeugschaden identifiziert und langfristig abgestellt werden kann. Abhängig von den Rahmenbedingungen des anwendenden Unternehmens kann es durchaus sinnvoll sein, die Zuordnung der genannten Methoden zu bestimmten Projektsituationen anders zu wählen sowie weitere oder andere Methoden zu nutzen.

Zusammengefasst kann mithilfe der genannten Methoden explizites Wissen generiert und durch Kombination mit bestehendem Wissen in neues explizites Wissen umgewandelt werden. Das neu gewonnene explizite Wissen kann anschließend der Wissensbasis des Unternehmens zugeführt werden. Das zugeführte Wissen wird für den Werkzeugbau und die Serienproduktion durch die anschließende Internalisierung durch die Mitarbeitenden entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus nutzbar gemacht. Der bedarfsgerechte Wissensabruf entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus wird nachfolgend beschrieben.

Bedarfsgerechter Wissensabruf

Der Prozess und die Funktionen des bedarfsgerechten Wissensabrufs werden nachfolgend vorgestellt. Dabei wird zwischen den notwendigen Voraussetzungen und der Umsetzung eines bedarfsgerechten Wissensabrufs differenziert. Die beiden Aspekte sind in der nachfolgenden Abbildung 159 dargestellt.



Abbildung 159: Aspekte eines bedarfsgerechten Wissensabrufs⁷⁹²

Notwendige Voraussetzungen

Zur Umsetzung eines bedarfsgerechten Wissensabrufs im Kontext des gestalteten Wissensmanagementkonzeptes muss eine geeignete Infrastruktur geschaffen werden. Dazu sollte wie in Kapitel 5.3.4 beschrieben eine zentrale, digitale Wissensplattform für alle Stakeholder ent-

⁷⁹² Eigene Darstellung

lang des gesamten Werkzeuglebenszyklus eingesetzt werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass eine doppelte oder sogar widersprüchliche Datenführung vermieden wird und jeder Nutzer das ihm zugängliche Wissen jederzeit mit geringem Aufwand finden und einsehen kann. Weitere wichtige Voraussetzungen sind nachfolgend aufgeführt:

- Kompatibilität der digitalen Wissensplattform mit verschiedenen Endgeräten
- Startseite mit intelligenter Such- und Eingabefunktion
- Klar und eindeutig definierte Wissenskategorien für alle Stakeholder
- Bearbeitungs- und Feedbackfunktionen
- Möglichkeit, Bezüge zwischen einzelnen Wissensfragmenten aufzubauen
- Möglichkeit, auf verwandtes Wissen verweisen zu können

Mithilfe der Feedbackfunktion soll der Wissenabrufende eine Bewertung des expliziten Wissens an den Verantwortlichen senden können. Der Verantwortliche hat dann die Möglichkeit über eine Bearbeitungsfunktion, Änderungen am dokumentierten Wissen vornehmen oder neues Wissen hinzufügen zu lassen. Für eine einfache und zielführende Suche ist es sinnvoll eine einheitliche Sprache im Werkzeugbau zu definieren. Beispielsweise kann eine Werkzeugkomponente in der Praxis von verschiedenen Personen unterschiedlich benannt werden.⁷⁹³

Umsetzungskonzept

Die Umsetzung eines bedarfsgerechten Wissensabrufs wird aus zwei Perspektiven beschrieben. Zunächst erfolgt die Gestaltung des Umsetzungskonzepts aus Sicht der beteiligten Unternehmen, im zweiten Schritt folgt die Beschreibung aus Sicht des Anwendenden. Aus der Perspektive der beteiligten Unternehmen sollte für eine bedarfsgerechte Wissensverteilung ein sich kontinuierlich weiterentwickelnder Wissensmarkt geschaffen werden. Auch wenn durch die Bearbeitung von Projekten jedes Mal neues Wissen entsteht, kann es darüberhinausgehende Wissensbedarfe geben. Zu Deckung dieser Wissensbedarfe kann extern Wissen zugekauft werden, z. B. durch Schulungen oder die Teilnahme an Arbeitskreisen. Ein qualitativ hochwertiges und beständig wachsendes Wissensangebot ist die Voraussetzung, sodass den Mitarbeitenden bedarfsgerecht das passende Wissen bereitgestellt werden kann. Die Wissensnachfrage und das Wissensangebot sollten dabei von einer zentralen Stelle aufgenommen, analysiert und orchestriert werden, um für alle beteiligten Parteien den größten Mehrwert durch die Nutzung des werkzeublebenszyklusübergreifenden Wissensmanagements zu generieren und die begrenzten Ressourcen für die Wissensbereitstellung in den Bereichen mit dem größten Wissensbedarf einzusetzen.

Für die Akzeptanz des Wissensmanagements ist insbesondere die Schaffung einer Wissensnachfrage wichtig. Die Nachfrage kann beispielsweise durch die Einführung von Abnahmeverfahren in Verbindung mit Checklisten entlang des Werkzeuglebenszyklus angeregt werden. Am Beispiel der Werkzeuginstandhaltung kann die Generierung einer Wissensnachfrage verdeutlicht werden. Der für die Werkzeuginstandhaltung zuständige Mitarbeitende kann eine Checkliste einsehen, welche für die Werkzeugabnahme nach der durchgeführten Instandhal-

⁷⁹³ Vgl. Eversheim; Klocke (Werkzeugbau mit Zukunft), 1998, S. 118.

tung verwendet wird. Diese Checkliste wird regelmäßig aktualisiert und entspricht den neuesten Erkenntnissen der Werkzeuginstandhaltung. Für die korrekte Durchführung der Werkzeuginstandhaltung benötigt der Mitarbeitende Fachwissen. Falls sich das benötigte Wissen noch nicht um implizites Wissen des Mitarbeitenden handelt, so muss dieser nach explizitem Wissen suchen, um es zu internalisieren. Das explizite Wissen wird durch das zuvor beschriebene Wissensangebot des Werkzeugbaus abgedeckt. Durch diese Vorgehensweise kann projektübergreifendes Wissen bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt werden ohne es einem Mitarbeitendem aufzuzwingen.

Aus der Perspektive des Anwendenden ist insbesondere die einfache und kontextbezogene Bereitstellung des Wissens von großer Bedeutung. Dazu sollte bereits mit der Anmeldung des Mitarbeitenden im System definiert sein, welche Zugriffsrechte, Rollenprofile und Kenntnisstände der Mitarbeitende innehat, damit die Wissensbereitstellung bedarfsgerecht, zugeschnitten auf seinen Wissensbedarf und entsprechend seines Kenntnisstands erfolgen kann. Darüber hinaus sollte das System den Anwendungskontext des Mitarbeitenden erfassen und berücksichtigen können. Kontaktiert der Mitarbeitende beispielsweise bei einem Werkzeugbruch während der Serienproduktion das Wissensmanagementsystem, um Wissen zur Behebung der werkzeugbedingten Störung zu erhalten, sollte der Kontext der Anfrage, in diesem Fall der Produktionsauftrag, das verwendete Werkzeug, die Historie des Werkzeugs sowie die relevanten Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren mit der Anfrage an das Wissensmanagement übermittelt werden. Somit kann der mögliche Lösungsraum mithilfe der Kontextinformationen eingeschränkt und dem Mitarbeitenden eine zielgerichtete und für ihn adäquate Lösung präsentiert werden.

Zusammengefasst ist ein werkzeuglebenszyklusübergreifendes Wissensmanagement essentiell für die langfristig erfolgreiche Umsetzung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Nur wenn Erkenntnisse, die von einer Partei zu einem spezifischen Zeitpunkt über den Werkzeuglebenszyklus gewonnen werden, einer anderen Partei zu einem anderen Zeitpunkt anwendungsfall- und adressatenorientiert bereitgestellt werden können, ist sichergestellt, dass Optimierungspotenziale zeitnah und nachhaltig umgesetzt und damit Kosteneinsparungen realisiert werden können. Ein bidirektionaler, zielgerichteter und adressatengerechter Informationsfluss ist essentiell, damit das über den Werkzeuglebenszyklus gewonnene Wissen für alle beteiligten Parteien letztendlich zu einem wettbewerbsdifferenzierenden Faktor wird.

5.4 Wechselwirkungen der Gestaltungselemente

Wechselwirkungen der Gestaltungselemente bestehen grundsätzlich in zwei Richtungen. Zum einen gibt es Wechselwirkungen nach innen gerichtet, zwischen den einzelnen Gestaltungselementen. Zum anderen gibt es Wechselwirkungen nach außen gerichtet, zwischen den einzelnen Gestaltungselementen und der Außenwelt. Die beiden Arten von Wechselwirkungen werden im Folgenden detailliert betrachtet.

Das Strukturelement Digitale Werkzeugakte bildet den Kern des Gestaltungsmodells und bildet die systematische Entwicklung einer anforderungsgerechten Datenstruktur für die Werkzeuglebenszykluskosten und -daten ab. Entsprechend bestehen starke Wechselwirkungen mit allen Aktivitätselementen und dem Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement. Insbesondere die drei Aktivitätselemente und das Strukturelement Digitale Werkzeugakte bedingen sich gegenseitig. Zum einen, wenn zusätzliche Daten oder Kostenfaktoren in die Datenstruktur integriert werden, die erfasst, analysiert und angewendet werden sollen, oder zum anderen, wenn für weitere datenbasierte Use Cases oder tiefergehende Datenanalyse weitere Daten oder die gleichen Daten aus einem höherwertigen Quellsystem benötigt werden. In Bezug auf das Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement bestehen die Wechselwirkungen darin, dass über den gesamten Werkzeuglebenszyklus Wissen abgespeichert und abgerufen wird. Dieses Wissen basiert zum größten Teil auf Daten und Kostenfaktoren, die in der Digitalen Werkzeugakte gespeichert sind.

Die Aktivitätselemente Instanzbasierte Datenerfassung, Bauteilspezifische Datenanalyse und Datenbasierte Use Cases beschreiben, wie die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse im Detail gestaltet werden sollte, um die Werkzeugkosten je produziertem Teil bzw. die Werkzeuglebenszykluskosten nachhaltig zu senken und den Werkzeugeinsatz zu optimieren. Zur Gestaltung der instanzbasierten Datenerfassung werden die einzelnen Schritte zur Entwicklung eines anforderungsgerechten Erfassungskonzepts vorgestellt. Durch die Vorgabe der Qualität und Quantität der erfassten Daten hat das anforderungsgerechte Erfassungskonzept Auswirkungen auf die Gestaltung sowohl der bauteilspezifischen Datenanalyse als auch der Identifikation und Bewertung der datenbasierten Use Cases. Im Rahmen der bauteilspezifischen Datenanalyse werden verschiedene Analyseszenarien inklusive der dafür notwendigen Voraussetzungen vorgestellt. In Abhängigkeit von dem anwenderabhängigen Informationsbedarf und den daraus resultierenden Anforderungen ergeben sich Auswirkungen auf die Gestaltung der Digitalen Werkzeugakte, der instanzbasierten Datenerfassung sowie der Identifikation und Bewertung der datenbasierten Use Cases. Die Gestaltung der Identifikation und Bewertung datenbasierter Use Cases wiederum hat Auswirkungen auf die Gestaltung aller Elemente des Gestaltungsmodells, da durch die kontinuierliche (Weiter-)Entwicklung und Umsetzung von datenbasierten Use Cases Wechselwirkungen zwischen allen Elementen bestehen.

Das Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement beschreibt die zentrale digitale Wissensplattform, mit der alle Stakeholdern entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus nutzerfreundlich Wissen dokumentieren und bedarfsgerecht abrufen können. Folglich bestehen starke Wechselwirkungen zwischen den Aktivitätselementen Instanzbasierte Datenerfassung und Bauteilspezifische Datenanalyse, die maßgeblich die Qualität und Quantität des Wissens beeinflussen, sowie dem Strukturelement Digitale Werkzeugakte, in dem die Struktur der Daten beschrieben wird.

Über die beschriebenen inneren Wechselwirkungen des Gestaltungsmodells hinaus bestehen vielfältige Wechselwirkungen mit anderen Prozessen, Ressourcen und Entitäten innerhalb des

Werkzeugbaubetriebs. Strategische, prozessuale, organisatorische sowie infrastrukturelle Aspekte haben notwendigerweise Auswirkungen auf andere Abteilungen. Dazu zählen beispielsweise die Werkzeugentwicklung, die mechanische Fertigung sowie die Montage und Reifmachung des Werkzeugbaus. Das Gestaltungsmodell hat zudem Auswirkungen auf die Ertragsstrukturen sowie deren Ausgestaltung, wenn zukünftig die Werkzeuglebenszykluskosten als kaufrelevantes Kriterium an Bedeutung gewinnen.

Abschließend hat das Gestaltungsmodell Einfluss auf Schnittstellen außerhalb des Werkzeugbaus. Durch die stärkere Vernetzung mit der Serienproduktion sowie der Werkzeuginstandhaltung, falls diese nicht Teil des Werkzeugbaus sind, ist eine signifikante Erhöhung des Informationsaustausches in Bezug auf die Frequenz und Intensität zu erwarten. Die erläuterten Wechselwirkungen zwischen den Gestaltungselementen sind in Abbildung 160 in Form von bidirektionalen Pfeilen dargestellt.



Abbildung 160: Wechselwirkungen der Gestaltungselemente⁷⁹⁴

⁷⁹⁴ Eigene Darstellung

6 Verifizierung anhand von Fallbeispielen

Nachdem in Kapitel 5 das Gestaltungsmodell mit seinen fünf Gestaltungsfeldern detailliert worden ist, folgt in diesem Kapitel die Verifizierung des Modells anhand von Fallbeispielen. Die Anwendung des Modells findet anhand von zwei in Bezug auf den Betrachtungsbereich repräsentativen Unternehmen statt. Die Verifizierung adressiert somit die letzte Phase der angewandten Forschung nach ULRICH⁷⁹⁵ und schließt den Forschungsprozess ab. Das Gestaltungsmodell wird anhand von Fallbeispielen der Hilti AG sowie der Progress-Werk Oberkirch AG in Bezug auf eine konkrete Ausgangssituation und Problemstellung angewendet. Im Rahmen der Modellanwendung wird der Fokus sowohl für den internen Werkzeugbau der Hilti AG als auch den internen Werkzeugbau der Progress-Werk Oberkirch AG auf alle fünf Gestaltungsfelder gelegt. Beide Betriebe stellen Stanz- und Blechumformwerkzeuge her, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich des konkreten Werkzeugtyps sowie der Branche, Größe und Form des herzustellenden Produkts. Eine vollständige Validierung wird sichergestellt, indem die fünf Felder des Gestaltungsmodells an zwei Fallbeispielen mit heterogenen Rahmenbedingungen angewendet werden. Die unterschiedlichen Rahmenbedingungen werden detailliert in der Beschreibung der Ausgangssituation des jeweiligen Unternehmens vorgestellt. In Abhängigkeit von der spezifischen Ausgangssituation sowie individuellen Vorarbeiten werden die in Kapitel 5 detaillierten Gestaltungselemente im Rahmen der Validierung vollständig oder in verkürzter Form angewendet.

6.1 Fallbeispiel 1: Hilti AG

Die Hilti AG ist ein internationaler Werkzeughersteller mit mehr als 32.000 Mitarbeitenden. Der Hauptsitz ist in Schaan, Liechtenstein. Die Brüder Martin und Eugen Hilti haben die Firma Hilti 1941 als „Hilti Maschinenbau OHG“ gegründet.⁷⁹⁶ Im Jahr 2022 hat die Gruppe einen Gesamtumsatz von mehr als 6,3 Milliarden CHF (ca. 6,6 Milliarden €) erzielt.⁷⁹⁷ Das Unternehmen gliedert sich in die neun Geschäftsbereiche Dübeltechnik, Elektrogeräte & Zubehör, Direktbefestigung & Schraubtechnik, Brandschutzsysteme, Diamanttechnik, Geräteservices, Messtechnik, Lösungen für Befestigungstechnik und Installationstechnik.⁷⁹⁸ Hilti betreibt ein globales Fertigungsnetzwerk mit Werken in Liechtenstein, Österreich, Deutschland, Ungarn, Norwegen, Indien, Taiwan, China, den USA und Mexiko.

6.1.1 Ausgangssituation

Der Betrachtungs- und Anwendungsbereich des vorliegenden Fallbeispiels umfasst den Werkzeugbau sowie die Serienproduktion der Hilti AG am Standort Liechtenstein. In Werk 1 (P1) in

⁷⁹⁵ Vgl. Kapitel 1.4

⁷⁹⁶ Vgl. Hilti AG (Über Hilti), 2023; Vgl. Hilti AG (Firmengeschichte), 2023.

⁷⁹⁷ Vgl. Hilti AG (Finanzbericht 2022), 2022, S. 4.

⁷⁹⁸ Vgl. Hilti AG (Unternehmensbericht 2020), 2020, S. 6.

Schaan, werden Direktmontageelemente, Metaldübel und Diamantschneidesegmente gefertigt. Im Werk sind mehr als 360 Mitarbeitende beschäftigt.⁷⁹⁹ Neben den drei genannten Produktionsbereichen ist der technische Service und der interne Werkzeugbau mit mehr als 40 Mitarbeitenden am Standort Schaan hervorzuheben. Der interne Werkzeugbau besteht seit 1999 und ist auf die Sicherstellung der Werkzeugversorgung im Verbund mit der Konzernforschung sowie der Produktentwicklung fokussiert. Der interne Werkzeugbau versorgt neben dem Produktionsstandort Schaan weitere internationale Fertigungsstandorte mit Kaltmassiv-, Stanz-Biege- und Induktionswerkzeugen.⁸⁰⁰ Der interne Werkzeugbau der Hilti AG konnte seine Leistungsfähigkeit bereits mehrfach durch die Teilnahme am Wettbewerb Excellence in Production, ausgerichtet durch das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen und dem Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT, bezeugen. In den Jahren 2015 und 2018 gehörte der Werkzeugbau zu den Finalisten in der Gruppe Interner Werkzeugbau unter 50 Mitarbeitende, in den Jahren 2008 und 2019 ist der Werkzeugbau zum Sieger der Kategorie ernannt worden.⁸⁰¹ Als Zulieferer für die Bauindustrie wird die Hilti AG und der interne Werkzeugbau intensiv von marktseitigen Entwicklungen beeinflusst. Zur Stärkung der eigenen Wettbewerbsposition wird kontinuierlich die eigene Wertschöpfung analysiert und optimiert. Als ein Stellhebel ist die Reduzierung der Werkzeugkosten über den gesamten Lebenszyklus identifiziert worden.

6.1.2 Anwendung

Der Fokus der Anwendung liegt auf den fünf Gestaltungselementen Digitale Werkzeugakte, Instanzbasierte Datenerfassung, Bauteilspezifische Datenanalyse, Datenbasierte Use Cases und Übergreifendes Wissensmanagement. Die Anwendung der Gestaltungselemente erfolgt durch die Mitarbeitenden des internen Werkzeugbaus sowie der angeschlossenen Serienproduktion. Die Hilti AG beschäftigt sich bereits seit längerem mit der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse mit der Zielsetzung, die Werkzeugkosten je hergestelltem Endprodukt langfristig zu senken. Zunächst sind dazu die Werkzeugstandmengen für ausgewählte Werkzeuge mittels eines ausgedruckten Formulars handschriftlich erfasst und anschließend manuell in Excel überführt und ausgewertet worden. Dieser Prozess erwies sich als fehleranfällig, aufwändig und mitarbeitendenunfreundlich. Daraufhin ist im Jahr 2019 das Projekt Digital Tool Lifetime Tracking (DTLTT) mit der Zielsetzung ausgerufen worden, die Werkzeugproduktivität zu erhöhen und die Werkzeugkosten sowie den Lagerbestand an Werkzeugsatzteilkomponenten langfristig zu senken. Zur Realisierung der ausgerufenen Zielsetzung ist in Zusammenarbeit mit dem Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen ein Konzept für die digitale Erfassung und systematische Auswertung von Werkzeugstandmengen entwickelt und anschließend im MES-System implementiert worden.

Im ersten Schritt ist auf Basis der definierten Zielsetzung eine Digitale Werkzeugakte konzipiert worden, die kontinuierlich weiterentwickelt und detailliert wird. Dazu sind zunächst ge-

⁷⁹⁹ Vgl. Hilti AG (Produktionsstätten), 2023.

⁸⁰⁰ Vgl. Excellence in Production (Unternehmensprofil Hilti AG), 2019.

⁸⁰¹ Vgl. Excellence in Production (Rückblick EIP-Wettbewerb).

meinsam mit den Mitarbeitenden des Werkzeugbaus, der Serienproduktion sowie den angrenzenden Bereichen die für die Zielerreichung relevanten Daten und Kostenpositionen ermittelt worden. Nachfolgend wird zunächst auf die relevanten Daten und anschließend die relevanten Kostenpositionen eingegangen. Im Bereich der Daten sind die übergeordneten Kategorien Anlage, Werkzeug, Produkt, Rohmaterial Endprodukt und Prozess identifiziert und anschließend gemeinsam detailliert worden. Im Bereich der Kosten wird übergeordnet zwischen den beiden Kategorien Werkzeugbeschaffungskosten und Werkzeugnutzungskosten differenziert. Unter der Kategorie Werkzeugbeschaffungskosten werden alle Kosten verstanden, die für die externe oder interne Beschaffung von Komplettwerkzeugen sowie von einzelnen Werkzeugkomponenten anfallen. In der Kategorie Werkzeugnutzungskosten sind alle Kosten, die während der Nutzungsphase des Werkzeugs anfallen, zusammengefasst. Dazu zählen insbesondere Instandhaltungskosten, Kosten für werkzeugbedingte Stillstände sowie Lagerkosten für Werkzeuersatzteilkomponenten. Bei der Hilti AG sind in der Kategorie Werkzeugnutzungskosten zunächst die größten Kostentreiber identifiziert und anschließend in einer Aufwands-Nutzen-Bewertung die zu erfassenden Kostenpositionen definiert worden.

Im zweiten Schritt ist der Detaillierungsgrad der Digitalen Werkzeugakte diskutiert worden. Aufgrund der modularen Bauweise der Werkzeuge und der daraus resultierenden Mehrfachverwendung von Baugruppen und einzelnen Werkzeugkomponenten in unterschiedlichen Konstellationen und Werkzeugen ist die Erfassung auf Werkzeugkomponentenebene festgelegt worden. Da die Standmengen auch für einen spezifischen Werkzeugtyp stark variieren können, erfolgt die Erfassung für jede einzelne Instanz. Die Erfassung ist zunächst auf Verschleißkomponenten begrenzt. Für die Instanzbasierte Datenerfassung ist zunächst gemeinsam ein Soll-Prozess für die Aufnahme der unterschiedlichen Daten und Kostenpositionen mit Fokus auf die Werkzeugnutzungsphase entwickelt und anschließend Anforderungen an eine Softwarelösung zur digitalen Unterstützung der Erfassung abgeleitet worden. Die Instanzbasierte Datenerfassung ist notwendig, um während oder vor dem Rüstprozess die Verknüpfung zwischen den eingesetzten Werkzeuginstanzen und dem vorliegenden Produktionsauftrag möglichst fehlerfrei und mitarbeitendenfreundlich herzustellen. Dazu wird bereits beim Werkzeugzusammenbau im Werkzeugbau ein digitales Abbild des Werkzeugs durch das Abscannen eines DMC-Codes erstellt, welches während des Rüstvorgangs mit dem Produktionsauftrag verknüpft wird. Auf Basis dieser Verknüpfung ist es im weiteren Verlauf möglich, Daten der Kategorien Anlage, Werkzeug, Produkt, Rohmaterial Endprodukt und Prozess miteinander zu verknüpfen. Systemseitig ist dokumentiert, welche konkreten Werkzeugkomponenten, wann, welches Produkt, auf welcher Anlage, in welcher Stückzahl, mit welchem Rohmaterial und welchen Prozessparametern produziert haben. Auftretende werkzeugbedingte Störungen können mithilfe von Auswahllisten direkt an der Anlage durch den Anlagenbedienenden erfasst, klassifiziert und bei Bedarf durch ein Freitextfeld ergänzt werden. Auf Seite der Werkzeugkosten gestaltet sich die Erfassung aufgrund technischer Gegebenheiten schwieriger, weshalb zunächst nur die größten Kostentreiber erfasst werden. Die Erfassung aller relevanten Werkzeugdaten und -kosten wird für die Zukunft angestrebt. Die Vollständigkeit und Qualität der eingegebenen Daten weist zudem teilweise noch Verbesserungspotenzial auf. Daher ist unter anderem eine Datenampel implementiert worden, die die Anzahl der Statuswechsel

mit der Anzahl eingegebener Werkzeugbruchgründe abgleicht und in Abhängigkeit von dem Abweichungsgrad dem Anlagenbedienenden ein direktes Feedback zur Qualität der eingegebenen Daten in Form einer Ampel mit den Farben grün, gelb oder rot anzeigt.

Im Rahmen der bauteilspezifischen Datenanalyse ist zunächst in Abstimmung mit den unterschiedlichen Stakeholdern entlang des Werkzeuglebenszyklus definiert worden, welche Ursache-Wirkungszusammenhänge analysiert und in welcher Form, welchem Stakeholder als messbare Kennzahlen präsentiert werden sollen. Dabei wird zwischen kurz- und langfristigen Zielen für die Datenanalyse unterschieden. Kurzfristig möchte der Anlagenbedienende sowie der Kostenverantwortliche eines Fertigungsbereichs täglich und zusätzlich über eine Woche aggregiert über Abweichung bei der Werkzeugperformance und den Werkzeugkosten je hergestelltem Endprodukt informiert werden. Im Falle von größeren Abweichungen kann unmittelbar mit der Ursachenanalyse begonnen werden. Langfristig gesehen möchten die Produktionsingenieure bzw. die Leiter der einzelnen Produktionsunits möglichst alle Ursache-Wirkungszusammenhänge verstehen, die dazu führen, dass es teilweise systematische Abweichungen bei den erreichten Standmengen für einen Werkzeugtyp gibt. Die Aufgabe der bauteilspezifischen Datenanalyse ist es, diese Ursache-Wirkungszusammenhänge aufzuzeigen und das entsprechende Einsparpotenzial der unterschiedlichen Optimierungspotenziale vergleichbar zu machen. Anschließend kann die Produktionsleitung oder ein Produktionsingenieur auf Basis der gegebenen Informationen die Projekte zur Reduzierung der Werkzeugkosten datenbasiert priorisieren. Darüber hinaus sollen langfristig die zu erreichenden Standmengen in Abhängigkeit von den Rahmen- und Einsatzbedingungen vorhergesagt werden können, um werkzeugbedingte Produktionsstillstände und damit verbundene Kosten zu vermeiden. Aufgrund der noch ausbaufähigen Datenlage in Bezug auf die Werkzeugeinsatzdaten sowie die erfassten Werkzeugkosten während der Werkzeugnutzungsphase konnte die langfristige bauteilspezifische Datenanalyse bisher nur konzeptionell entwickelt und im Austausch mit den verschiedenen Stakeholdern validiert werden.

Im nächsten Schritt sind aufbauend auf der initial postulierten Zielsetzung für das DTLTT Projekt sowie der konzeptionierten und implementierten Digitalen Werkzeugakte gemeinsam 16 Datenbasierte Use Cases entwickelt worden, die auf den erfassten Werkzeuglebenszyklusdaten und -kostenpositionen basieren und letztendlich durch die zu erzielenden Einsparungen die Investitionen für das DTLTT Projekt rechtfertigen. Beispielhaft wird an dieser Stelle der Use Case optimaler Werkzeugeinsatz erläutert. Unter der Voraussetzung, dass alle relevanten Werkzeugeinsatzdaten und -kosten in hinreichend guter Qualität erfasst werden und die Ursache-Wirkungszusammenhänge in Bezug auf die zu erreichende Werkzeugstandmenge analysiert und interpretiert werden können, soll in Zukunft die erreichbare Reststandmenge für eine Werkzeugkomponente adaptiv entsprechend der Verwendung des Werkzeugs errechnet werden. Zudem soll die Verwendung der einzelnen Werkzeugkomponenteninstanzen in unterschiedlichen Werkzeugen für die Herstellung verschiedener Produkte in Bezug auf die erreichbare Standmenge optimiert werden. Somit sollen langfristig die Werkzeugkosten je produziertem Teil kontinuierlich reduziert und die werkzeugbedingte OEE in der Serienproduktion kontinuierlich gesteigert werden, um einen möglichst optimalen Einsatz jeder Werkzeugkomponenteninstanz zu ermöglichen.

Der Aspekt Übergreifendes Wissensmanagement ist bei der Hilti AG bereits andiskutiert, aber aufgrund systemseitiger Reglementierungen noch nicht implementiert worden. Langfristig gesehen sollen alle für die Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten und die Optimierung des Werkzeugeinsatzes relevanten Kostenpositionen und Daten direkt mit der entsprechenden Werkzeuginstanz verknüpft und (teil-)automatisiert kontextualisiert werden. Die Zielsetzung bei der Wissensaufnahme besteht darin, nicht nur Daten und Informationen, sondern Wissen in der Digitalen Werkzeugakte abzuspeichern und über den Werkzeuglebenszyklus erarbeitete Potenziale langfristig für alle Stakeholder entlang des Werkzeuglebenszyklus nutzbar zu machen. Die Zielsetzung für den Wissensabruf sieht eine übergreifende digitale Wissensplattform vor, die von allen Stakeholdern entlang des Werkzeuglebenszyklus genutzt werden kann. Die Umsetzung der erläuterten Zielsetzungen für die Wissensaufnahme und den Wissensabruf sind bereits diskutiert und grob konzeptioniert, aber noch nicht umgesetzt worden. Die Umsetzung ist für die Zukunft geplant.

6.1.3 Fazit

Zur Realisierung einer datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse realisiert die Hilti AG die Gestaltungsfelder Digitale Werkzeugakte, Instanzbasierte Datenerfassung, Bauteilspezifische Datenanalyse, Datenbasierte Use Cases und Übergreifendes Wissensmanagement in unterschiedlichen Reifegraden. Auf Basis des gemeinsam durchgeführten DTLTT Projekts konnten in allen fünf Gestaltungsfeldern gemeinsam mit der Hilti AG ein initiales Konzept entwickelt werden, das in einem Basisumfang bereits in einem Testbereich der Serienproduktion implementiert worden ist und nun stufenweise ausgerollt wird. Parallel wird der Funktionsumfang auf Basis des entwickelten Konzepts kontinuierlich weiterentwickelt. Im Bereich der Digitalen Werkzeugakte ist das zum einen die Integration der Prozessdaten und zum anderen die Erfassung und Integration der unterschiedlichen Kostenpositionen während der Werkzeugnutzungsphase. Im Bereich der Instanzbasierten Datenerfassung stehen die anwenderfreundliche, fehlervermeidende und kategorisierte Erfassung von Kontext- und Detailinformationen sowie die detaillierte Messung und Verbesserung der erfassten Informationsqualität im Fokus. Im Gestaltungsfeld Bauteilspezifische Datenanalyse werden aktuell die erreichte Standmenge je Werkzeugkomponenteninstanz mit der durchschnittlichen Sollstandmenge des Werkzeugtyps verglichen und Trends visualisiert. Zudem wird die Standardabweichung der erreichten Standmengen zur Sollstandmenge für einen Werkzeugtyp berechnet, um die Prozessstabilität bewerten und geeignete Maßnahmen ableiten zu können. Darüber hinaus werden die Werkzeugkosten je produziertem Teil erfasst und anhand verschiedener Kriterien geclustert, um das größte Werkzeugkosteneinsparpotenzial kenntlich zu machen. Die eigentliche Datenanalyse zur Identifikation der Ursache-Wirkungszusammenhänge mit verschiedenen Data Analytics Methoden ist noch nicht gestartet, da die Menge an gesammelten Daten noch nicht ausreichend ist. Im Bereich der Datenbasierten Use Cases werden bereits erste befähigende Use Cases wie die Erfassung der Werkzeugdaten und -kosten sowie die Entwicklung und Umsetzung eines übergreifenden Dashboards umgesetzt. Die Umsetzung weiterer Use Cases, insbesondere mit hohem Kosteneinsparpotenzial, sind für die Zukunft geplant, sobald die notwendigen Daten und Kostenpositionen erfasst werden können und in ausreichender Menge

und Qualität vorliegen. Im Bereich Übergreifendes Wissensmanagement wird momentan noch auf bereits bestehende, etablierte Fehlererfassungs- und KVP-Prozesse zurückgegriffen. Langfristig sollen die gesammelten Daten und Informationen in der Digitalen Werkzeugakte unmittelbar oder wöchentlich kontextualisiert werden, um einen kontinuierlichen Wissensfluss in das System zu gewährleisten. Im zweiten Schritt soll das gesammelte Wissen entlang des Werkzeuglebenszyklus den einzelnen Stakeholdern bedarfsgerecht, anwenderfreundlich und kontextspezifisch zur Verfügung gestellt werden. Zusammenfassend ist bei der Hilti AG die Grundlage für alle fünf Gestaltungsfelder gelegt, die in den nächsten Jahren kontinuierlich ausgebaut werden kann, um die initial ausgegebene Zielsetzung, die Werkzeugkosten je hergestelltem Endprodukt langfristig zu senken, zu erreichen. In der nachfolgenden Abbildung 161 ist der Status quo in Bezug auf den Konzeptions- und Umsetzungsgrad in den fünf Gestaltungsfeldern dargestellt.

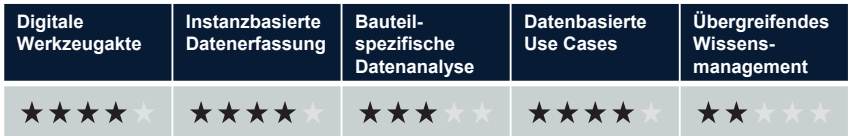


Abbildung 161: Status quo Konzeptions- und Umsetzungsgrad Hilti AG⁸⁰²

6.2 Fallbeispiel 2: PWO AG

Die PWO AG ist ein internationaler Automobilzulieferer mit mehr als 2.800 Mitarbeitenden. Der Hauptsitz ist in Oberkirch in Deutschland.⁸⁰³ Die Gründung erfolgte im Jahr 1919 in Stadelhofen als Progress-Werk Oberkirch von sieben schwäbischen Unternehmern. Der Börsengang und die Umfirmierung zur PWO AG erfolgte im Jahr 1978.⁸⁰⁴ Im Jahr 2022 erzielte die PWO AG einen Umsatz in Höhe von 530 Millionen €.⁸⁰⁵ Die PWO-Gruppe fertigt für die internationale Mobilitätsindustrie Komponenten überwiegend aus Stahl und in geringem Umfang aus Aluminium. Alle Lösungen werden in Fahrzeugen unterschiedlicher Antriebsarten verbaut, die PWO-Gruppe verfügt über die sieben Geschäftsfelder Motorengehäuse, Luftfedersysteme, Batterie- und Elektronikdeckel, Lenkungskomponenten, Sitzkomponenten, Karosseriekomponenten und Instrumententafelträger. Die PWO-Gruppe ist mit insgesamt 9 Standorten in den Ländern Deutschland, Tschechien, Serbien, Kanada, Mexiko und China weltweit vertreten.⁸⁰⁶

6.2.1 Ausgangssituation

Der Betrachtungs- und Anwendungsbereich des vorliegenden Fallbeispiels umfasst den Werkzeugbau sowie die Serienproduktion der PWO AG am Standort Oberkirch. Am Standort in

⁸⁰² Eigene Darstellung
⁸⁰³ Vgl. PWO AG (Geschäftsbericht 2022), 2022, S. 2; 31.
⁸⁰⁴ Vgl. PWO AG (Unternehmensgeschichte), 2023.
⁸⁰⁵ Vgl. PWO AG (Geschäftsbericht 2022), 2022, S. 2.
⁸⁰⁶ Vgl. PWO AG (Geschäftsbericht 2022), 2022, S. 31.

Oberkirch arbeiteten im Jahr 2022 1.045 Mitarbeitende, wobei 82 der Mitarbeitenden im Werkzeugbau beschäftigt waren. Der Werkzeugbau stellt die Werkzeugversorgung in Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung und Serienproduktion sicher und unterstützt aktiv den Wissensaustausch zwischen allen beteiligten Entitäten entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus. Die PWO AG verfügt zudem über zwei weitere interne Werkzeugbaubetriebe in Tschechien und Serbien. Neben dem Wissensaustausch am Standort Oberkirch zwischen den verschiedenen beteiligten Entitäten fokussiert die PWO AG den Know-how-Austausch zwischen den verschiedenen Werkzeugbaustandorten. Als Zulieferer für die Automobilindustrie in Zeiten der Transformation hin zum Elektroantrieb und starker Konkurrenz aus China befindet sich die PWO AG in einem herausfordernden und kostensensiblen Marktumfeld. Die Stärkung der eigenen Wettbewerbsposition durch effiziente und kostengünstige Produktionslösungen wird aktiv betrieben. In diesem Zusammenhang spielt die Reduzierung der Werkzeugkosten über den gesamten Lebenszyklus eine zunehmend bedeutendere Rolle.

6.2.2 Anwendung

Der Fokus der Anwendung liegt bei der PWO AG auf den fünf Gestaltungselementen Digitale Werkzeugakte, Instanzbasierte Datenerfassung, Bauteilspezifische Datenanalyse, Datenbasierte Use Cases und Übergreifendes Wissensmanagement. Die Anwendung der Gestaltungselemente erfolgt durch die Mitarbeitenden des internen Werkzeugbaus sowie der angeschlossenen Serienproduktion.

Die PWO AG hat bereits frühzeitig das Potenzial der Betrachtung des gesamten Werkzeuglebenszyklus erkannt und den Fokus auf die Entwicklung und Implementierung einer Digitalen Werkzeugakte gelegt. Die Zielsetzung der Digitalen Werkzeugakte besteht in der Sammlung und Verknüpfung sämtlicher Daten entlang des gesamten Werkzeuglebenszyklus, um auf Basis der gesammelten Daten den Werkzeugeinsatz zu verbessern und die Werkzeugkosten zu reduzieren. Nachfolgend werden zunächst die erfassten Werkzeugdaten vorgestellt, bevor auf die erfassten Werkzeugkosten eingegangen wird. Die Digitale Werkzeugakte umfasst Daten aus den Phasen der Werkzeugerstellung und der Werkzeugnutzung. Während der Werkzeugherstellung werden unter anderem die Umformsimulation, das Werkzeugdesign, der Werkzeugaufbau sowie Bewegungssimulationen digital erfasst und mit dem Werkzeug sowie dem herzustellenden Endprodukt verknüpft. Während der Werkzeugnutzungsphase werden Prozessdaten, Maschinendaten, Artikeldaten, Maschinenperipheriedaten, Werkzeugnutzungsdaten, KVP-Daten und Lessons-Learned-Daten erfasst. Bei den Prozessdaten werden z. B. Pressenkräfte und die Stößelposition dokumentiert und um durch den BDE-Leitstand erfasste Informationen ergänzt. Dazu gehören der Zeitpunkt des Auftragsstarts sowie des Auftragsendes, die Typnummer des Werkzeugs sowie die geplante und tatsächlich produzierte Stückzahl an Endprodukten. In der Kategorie Maschinendaten werden insbesondere Informationen zur Einstellung der spezifischen Presse erfasst. Eine weitere Kategorie bilden die Artikeldaten. Neben der Produktbezeichnung werden produktspezifische Detailinformationen in die Digitale Werkzeugakte aufgenommen. In der Kategorie Maschinenperipheriedaten finden sich detaillierte Informationen zu den einzelnen Produktionszeiten, wie z. B. Rüstzeiten, Ma-

schinen- oder Werkzeugstörungen und die gesamte Auftragsdauer. Unter der Kategorie Werkzeugnutzungsdaten werden Daten zum Einsatz des Werkzeugs angelegt, dazu gehören die Einsatz-, Störungs- und Instandhaltungshistorie für ein Komplettwerkzeug. Die Erfassung von Fehlern findet größtenteils mit Freitextfeldern statt und wird dem Komplettwerkzeug zugeordnet. Lessons Learned aus laufenden und abgeschlossenen Projekten werden zentral gesammelt und inklusive der Werkzeug- und der Positionsnummer innerhalb des Werkzeugs abgelegt. Zusätzlich können auch Fotos oder Zeichnungen hinterlegt werden. Bei den Werkzeuglebenszykluskosten werden neben den Werkzeugbeschaffungskosten, die Werkzeuginstandhaltungs- und werkzeugbedingten Stillstandskosten erfasst. Die einzelnen Daten- und Kostenpositionen der Digitalen Werkzeugakte werden in verschiedenen Systemen erfasst und teilweise automatisch, teilweise manuell verknüpft. Eine digitale Durchgängigkeit der Informationen über die verschiedenen Systemschnittstellen ist teilweise gegeben.

Die Datenerfassung erfolgt sowohl für die Werkzeugeinsatzdaten als auch die Werkzeugkosten übergeordnet für einen Werkzeugsatz bzw. für eine Werkzeugstufe auf der Typebene. Die Daten können entsprechend nicht einem spezifischen Werkzeugsatz bzw. einer Werkzeugstufe zugeordnet werden. Die gesammelten Daten und Kosten können zudem nicht verursachungsgerecht einzelnen Werkzeugkomponenten, die per ID identifizierbar sind, zugeordnet werden. Bei der PWO AG liegt begünstigend die Besonderheit vor, dass es jeweils nur eine feste Kombination aus eingesetztem Werkzeug, verwendeter Anlage und produziertem Endprodukt gibt. Diese Tatsache vereinfacht die Verknüpfung der unterschiedlichen Daten, da der Zusammenbau eines Werkzeugs aus verschiedenen neuen und bereits verwendeten Modulen nicht vorliegt. Entlang des Werkzeuglebenszyklus eingetragene Fehlermeldungen werden manuell in die Digitale Werkzeugakte übertragen und dort klassifiziert. Die Validierung der eingegebenen Daten und Kosten erfolgt manuell.

Im Bereich Datenanalyse liegt der Fokus insbesondere auf der Generierung von aussagekräftigen Kennzahlen. Dazu zählen beispielsweise die Werkzeuginstandhaltungskosten je 1000 produzierten Teilen. Zudem werden jeweils ABC- und Trendanalysen in allen Kostenkategorien durchgeführt, um die größten Treiber der Werkzeugkosten, bezogen auf einen Produkttyp, zu identifizieren. Beispielhaft seien hier die werkzeugbedingten Stillstandskosten für einen Produkttyp erwähnt. Die Kosten können aktuell nur einem Komplettwerkzeug zugeordnet werden. Die Zuordnung der Kosten zu einzelnen Modulen und Stufen ist in Planung. Eine detaillierte Auswertung der gesamten Werkzeuglebenszykluskosten, bezogen auf die über den Werkzeuglebenszyklus produzierten Teile, wird zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht durchgeführt. Eine detaillierte Kosten- und Ursache-Wirkungsanalyse von einzelnen Werkzeugverschleißkomponenten kann und wird aktuell nicht datenbasiert durchgeführt. Die Analyse und Nachbesprechung von eingetragenen Fehlermeldungen findet im Rahmen des täglichen Shopfloormeetings statt. Identifizierte Verbesserungen werden als KVP-Maßnahmen dokumentiert und allen Mitarbeitenden zur Verfügung gestellt. Die Erfassung der Fehlermeldungen in Form von Freitextfeldern erschwert eine automatisierte Auswertung und Klassifikation der Fehler. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt werden die gesammelten Daten noch nicht ganzheitlich mithilfe von Data Analytics-Tools analysiert und systematisch ausgewertet.

Im Bereich Datenbasierte Use Cases setzt die PWO AG zunächst hauptsächlich auf die Visualisierung von Kennzahlen zur Performance und Kostenwirkung der Werkzeuge im Produktionseinsatz. Hervorzuheben ist das Konzept für das werkzeublebenszyklusübergreifende Wissensmanagement. Auf der Basis eines Konsortialprojekts zum Thema Wissensmanagement in den Jahren 2012-2014 entwickelte die PWO AG ein ganzheitliches Konzept für ein werkzeublebenszyklusübergreifendes Wissensmanagement. Das entwickelte Konzept wird kontinuierlich weiterentwickelt und die Mitarbeitenden gezielt geschult. Eine der Kernzielsetzungen des Wissensmanagements ist die Wissensexternalisierung direkt am Ort des Geschehens. Dazu werden die Mitarbeitenden gecoacht, welche Informationen beispielsweise bei einem Werkzeugbruch in die Digitale Werkzeugakte eingetragen werden sollen, um die anschließende Fehleranalyse zielgerichtet durchführen zu können. Darüber hinaus werden die über den Werkzeublebenszyklus erfassten Informationen manuell klassifiziert, mit Hilfe der beteiligten Mitarbeitenden kontextualisiert und abschließend in eine zentrale Wissensdatenbank übertragen. Der Wissensabruf erfolgt über eine separate Maske und unterstützt die Mitarbeitenden mit Hilfe von Leitfragen, die den Lösungsraum einschränken und bei der Lösungsfindung unterstützen. Aktuell arbeitet die PWO AG an Lösungen, um die Wissensabgabe und -aufnahme für die Mitarbeitenden möglichst intuitiv und einfach zu gestalten.

6.2.3 Fazit

Zur Realisierung einer datenbasierten Werkzeublebenszykluskostenanalyse realisiert die PWO AG die Gestaltungsfelder Digitale Werkzeugakte, Instanzbasierte Datenerfassung, Bauteilspezifische Datenanalyse, Datenbasierte Use Cases und Übergreifendes Wissensmanagement in unterschiedlichen Detaillierungsstufen. Die klar definierte Zielsetzung für die datenbasierte Werkzeublebenszykluskostenanalyse unterstützt die PWO AG dabei, die bereits umgesetzten Maßnahmen im Anwendungskontext zielgerichtet weiterzuentwickeln. Die aktive und umfangreiche Adressierung der Sammlung von Werkzeugdaten und -kosten in einer Digitalen Werkzeugakte bildet eine gute Datengrundlage für eine fundierte und systematische Datenauswertung. Die Erfassung der Daten auf der übergeordneten Werkzeugtypebene beschränkt den Aufwand für die Datenerfassung, schränkt zugleich aber auch die Möglichkeiten der weiteren Datennutzung stark ein, da keine eindeutige Zuordnung von Produktionsauftrag, Fehlermeldung und Instandhaltungsaufwendung zu der verursachenden Werkzeugkomponente hergestellt werden kann. Die Erfassung der Daten auf der Typebene für Komplettwerkzeuge ermöglicht die Ausleitung von Kennzahlen zur Identifizierung von Abweichungen bei den Werkzeugkosten wie z. B. den erwähnten Instandhaltungskosten je 1000 produzierten Teilen. Die weitergehende Ausleitung von Kennzahlen mit Bezug zu einzelnen Instanzen sowie eine detaillierte und systematische Ursachen-Wirkungsanalyse ist aufgrund der fehlenden Verknüpfung mit der verursachenden Werkzeugkomponenteninstanz nicht möglich. Auch im Bereich der datenbasierten Use Cases kann das volle Potenzial erst genutzt werden, wenn die Datenerfassung wie bereits beschrieben weiter detailliert wird. Die manuelle Übertragung, Klassifizierung und Kontextualisierung der eingetragenen Fehlermeldung garantiert eine hohe Qualität des externalisierten Wissens, führt aber auch zu sehr hohem personellem Aufwand. Das entwickelte Konzept für das werkzeublebenszyklusübergreifende Wissensmanagement ist wie

beschrieben teilweise mit hohem personellem Aufwand verbunden, garantiert im Gegenzug eine hohe Qualität des verfügbaren Wissens und unterstützt PWO maßgeblich bei der Erreichung der gesetzten Ziele bei der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Die Umsetzung einer digital durchgängigen Wissensplattform mit Zugriff auf alle werkzeugrelevanten Daten und Kosten entlang des Werkzeuglebenszyklus durch die unterschiedlichen Stakeholder würde das Potenzial des Wissensmanagements bei PWO AG weiter steigern. Zusammenfassend sind bereits einige der vorgestellten Gestaltungsfelder in variierendem Reifegrad bei der PWO AG implementiert. Das größte Verbesserungspotenzial liegt in der Erfassung der werkzeugrelevanten Daten und Kosten je Werkzeugkomponente auf Instanzebene. Dieser Schritt ermöglicht die Umsetzung einer systematischen Ursache-Wirkungsanalyse, die Entwicklung und Implementierung von datenbasierten Use Cases wie beispielsweise eines intelligenten Ersatzteilmanagements sowie die Weiterentwicklung des Wissensmanagements. Weiteres Potenzial liegt in der Wissensaufnahme. Die Reduzierung von Freitextfeldern unterstützt eine (teil-)automatisierte Datenauswertung und Kontextualisierung der eingegebenen Daten und trägt zur Erhöhung der Datenqualität bei. In der nachfolgenden Abbildung 162 ist der Status quo in Bezug auf den Konzeptions- und Umsetzungsgrad in den fünf Gestaltungsfeldern dargestellt.

Digitale Werkzeugakte	Instanzbasierte Datenerfassung	Bauteil- spezifische Datenanalyse	Datenbasierte Use Cases	Übergreifendes Wissens- management
★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★

Abbildung 162: Status quo Konzeptions- und Umsetzungsgrad PWO AG⁸⁰⁷

6.3 Kritische Reflexion

Die Beschreibung der Anwendung der Gestaltungselemente in den zwei Fallbeispielen der Hilti AG sowie der PWO AG zeigt, dass die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse in der Unternehmenspraxis funktioniert. Im Rahmen der Validierung werden alle Gestaltungsfelder angewendet und das Modell somit vollständig verifiziert. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse in einen breiten Anwendungskontext wird sichergestellt durch die Anwendung der entwickelten Gestaltungsfelder unter heterogenen Rahmenbedingungen. Die Adressierung des in Kapitel 2.4 dargestellten Praxisdefizits ist somit gegeben. Neben dem Handlungsbedarf aus der Praxis konnten zudem alle wissenschaftlich theoretisch hergeleiteten Anforderungen⁸⁰⁸ an ein Gestaltungsmodell zur datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse bewiesen werden.

Die Erfüllung der kontext- und problemspezifischen Anforderungen wird mit der Anwendung des Gestaltungsmodells durch die beiden vorgestellten Praxisunternehmen bestätigt. Die kontextspezifischen Anforderungen sind die Anwendung auf den Werkzeugbau mit Fokus auf die

⁸⁰⁷ Eigene Darstellung
⁸⁰⁸ Vgl. Kapitel 3.1.2

Blech- und Massivumformung sowie der Betrachtung der Schnittstelle zwischen Werkzeugbau und Serienfertigung. Das Gestaltungsmodell berücksichtigt die Besonderheiten des Werkzeugbaus in der Blech- und Massivumformung und beleuchtet den gesamten Werkzeuglebenszyklus. Die Schnittstelle zwischen Werkzeugbau und Serienfertigung wird explizit berücksichtigt. Die erfolgreiche Anwendung des Gestaltungsmodells bei zwei internen Werkzeugbaubetrieben, die in hohem Maße mit der Serienproduktion interagieren und einen klaren Fokus auf die Blech- und Massivumformung haben, bestätigt die Erfüllung der kontextspezifischen Anforderungen.

Die problemspezifischen Anforderungen sind in die vier Unterkategorien Ganzheitliches Datenmodell, Systematische Datenerfassung und -erklärung, Datenanalyse und -auswertung sowie Datenbasierte Anwendungsfälle unterteilt. In der Kategorie Ganzheitliches Datenmodell wird zwischen den Anforderungen Erfassung der Werkzeuglebenszyklusdaten und Erfassung der Werkzeuglebenszykluskosten differenziert. Beide Unternehmen verfügen über klare Zielsetzungen für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse und über eine klare Zielvorstellung der zu erfassenden Werkzeuglebenszyklusdaten und -kosten. Die Erfüllung der Anforderung kann folglich in vollem Umfang bewiesen werden. Im Bereich Systematische Datenerfassung und -erklärung sind die Anforderungen Ganzheitliches Erfassungskonzept sowie Instanzbasierte Erfassung angeführt. Insbesondere die Hilti AG verfügt mit der digitalen und fehlervermeidenden Erfassung jeder Werkzeugkomponenteninstanz über ein ganzheitliches Erfassungskonzept und erfüllt die Instanzbasierte Erfassung. Die PWO AG ist von den Vorteilen eines ganzheitlichen Erfassungskonzepts sowie einer Instanzbasierten Erfassung überzeugt, hat die praktische Umsetzung aus verschiedenen Gründen jedoch noch nicht gestartet. Die Bestätigung der Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit einer Systematischen Datenerfassung und -erklärung sowie die bereits praktizierte Anwendung beweisen die vollständige Erfüllung dieser Anforderungen. In der dritten Unterkategorie Datenanalyse und -auswertung werden die Anforderungen Systematische Bedarfsableitung und Anwenderbezogene Kennzahlenentwicklung angeführt. Beide Unternehmen haben sich intensiv mit der Systematischen Bedarfsableitung sowie der Anwenderbezogenen Kennzahlenentwicklung auseinandergesetzt. Die Ergebnisse sind systematisch hergeleitete Bedarfe aus unterschiedlichen Perspektiven mit verschiedenen Fristigkeiten. In Abhängigkeit von den Unternehmen zur Verfügung stehenden Datenqualität und -quantität werden systematische Analysen genutzt, um unter anderem aussagekräftige Kennzahlen mit der Zielsetzung der ganzheitlichen oder partiellen Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten zu erstellen und anzuwenden. Die Erfüllung der Anforderungen kann daher ebenfalls in vollem Umfang bewiesen werden. Im vierten Bereich Datenbasierte Anwendungsfälle werden die Anforderungen Systematische Use Case Entwicklung sowie qualitative und quantitative Use Case Bewertung genannt. Die Erfüllung der genannten Anforderungen konnte durch die Anwendung in beiden Praxisunternehmen in vollem Umfang bewiesen werden. Die PWO AG hat systematisch den Use Case „werkzeuglebenszyklusübergreifendes Wissensmanagement“ erarbeitet, qualitativ und quantitativ bewertet sowie in Zusammenarbeit mit den Mitarbeitenden eingeführt. Die Hilti AG hat 16 datenbasierte Use Cases entwickelt und bewertet, wovon erste Use Cases bereits erfolgreich implementiert sind.

Die im Rahmen von Kapitel 6 beschriebenen Fallbeispiele sowie die anschließende Reflexion verifizieren das entwickelte Gestaltungsmodell als ganzheitlichen Lösungsansatz für die Branche Werkzeugbau. Resultierend hieraus kann die Erfüllung der übergeordneten Zielsetzung der vorliegenden Arbeit konstatiert werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der deutsche Werkzeugbau ist als Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Serienfertigung ein zentraler Befähiger einer leistungsfähigen produzierenden Industrie. Als solcher sieht er sich mit der notwendigen Überwindung der drei zentralen Herausforderungen einer zunehmenden Produktderivatisierung, einer Verkürzung von Produktlebenszyklen sowie günstigeren Faktorkosten globaler Wettbewerber konfrontiert. Folglich nimmt die je Variante zu produzierende Menge ab, wohingegen die Anzahl an zu produzierenden Varianten zunimmt. Die Zahlungsbereitschaft des Kunden, bezogen auf die Werkzeuge, die notwendig sind für die Herstellung eines Derivats, sinkt folglich. Dem zunehmenden Kostendruck für qualitativ hochwertige Werkzeuge können Werkzeugbaubetriebe in Hochlohnländern jedoch nicht durch eine Reduzierung der Preise begegnen. Dahingegen bietet die Erfassung, Analyse und Auswertung der Werkzeuglebenszyklusdaten und -kosten die Möglichkeit, die Ökoeffektivität des Werkzeugs und damit die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Im Anwendungskontext bedeutet dies die Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten bei einer gleichzeitigen Steigerung der Verfügbarkeit und Ausbringungsmenge des Werkzeugs. Dazu ist die detaillierte Erfassung und Auswertung von Zustands- und Prozessinformationen über den gesamten Werkzeuglebenszyklus notwendig. Zu diesem Zweck bieten sich datenbasierte Methoden an, die im Kontext von Industrie 4.0 auch im Werkzeugbau immer mehr an Relevanz gewinnen. Der Digitale Schatten stellt dabei die Basis für eine systematische und anforderungsgerechte Datensammlung und -analyse bereit.

Zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Werkzeugbaubetrieben wird im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit entsprechend der Phasen der angewandten Forschung nach UL-RICH & HILL ein Lösungsansatz entwickelt, mithilfe dessen Werkzeugbaubetriebe sowie ihre Kunden die Lebenszykluskosten ihrer Werkzeuge erfassen, analysieren und auswerten können, um die Werkzeugkosten je hergestelltem Teil nachhaltig zu senken. Zudem werden sie in die Lage versetzt, das entstehende Wissen anforderungsgerecht abzuspeichern und bedarfsgerecht über den gesamten Werkzeuglebenszyklus abzurufen. Somit beantwortet das Gestaltungsmodell die leitende Forschungsfrage „Wie kann die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse durchgängig gestaltet werden?“.

Der Aufbau des Gestaltungsmodells orientiert sich an dem Ordnungsrahmen, den das integrierte Management nach BLEICHER darstellt. Es beinhaltet die drei Managementaspekte Aktivitäten, Verhalten und Strukturen, die jeweils auf die drei Managementebenen normatives, strategisches und operatives Management verortet werden können.⁸⁰⁹ Das integrierte Management nach BLEICHER stellt somit einen ganzheitlichen Ordnungsrahmen auf und ist in der Wissenschaft als ganzheitlicher und integrativer Bezugsrahmen zur Betrachtung, Analyse und Lösung von Problemen der industriellen Praxis anerkannt. Für die Einordnung des Gestaltungsmodells in den Ordnungsrahmen nach BLEICHER muss die passende Managementebene festgelegt werden. Wie in Kapitel 2.1.5 beschrieben, ist für die Umsetzung einer datenbasierter Werkzeuglebenszykluskostenanalyse eine Integration des Werkzeugbaus in die Phase der

⁸⁰⁹ Vgl. Bleicher (Das Konzept Integriertes Management), 2011, S. 87-98.

Werkzeugnutzung beim Kunden sowie eine darauf aufbauende strukturierte Zusammenarbeit notwendig. Die Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse ist somit primär ein Aspekt des operativen Managements. Neben der wirtschaftlichen Effizienz sind im operativen Management sowohl die vertikale und horizontale Kommunikation als auch die unternehmensübergreifende Kooperation von Mitarbeitenden zu betrachten.⁸¹⁰

Das Gestaltungsmodell fungiert als Zielbild für die Gestaltung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse. Es besteht aus fünf Gestaltungselementen, die nachfolgend zusammenfassend beschrieben werden. Im Kern des Gestaltungsmodells steht das Strukturelement Digitale Werkzeugakte. Eine anforderungsgerechte Datenstruktur ist das Fundament für das zu konzeptionierende Gestaltungsmodell und daher als Mittelpunkt bzw. innerster Kreis des Gestaltungsmodells dargestellt. Die Datenstruktur dient dazu, alle für die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse notwendigen Werkzeugdaten und -kosten über den gesamten Lebenszyklus des Werkzeugs strukturiert zu sammeln.

Daran schließt sich als mittlerer Kreis des Gestaltungsmodells das Verhaltenselement Übergreifendes Wissensmanagement an. Ein Konzept für den übergreifenden inner- und außerbetrieblichen Austausch von Daten, Informationen und Wissen zwischen den unterschiedlichen Stakeholdern entlang des Werkzeuglebenszyklus unter Berücksichtigung der jeweiligen nutzerabhängigen Anforderungen ist das verbindende Glied zwischen Strukturelement und Aktivitätselementen. Im Vordergrund des Verhaltenselements übergreifendes Wissensmanagement steht die ganzheitliche Unterstützung bei der Nutzbarmachung der gesammelten, analysierten und ausgewerteten Daten, die Teil der Digitalen Werkzeugakte sind. Daher ist das Verhaltenselement als mittlerer Kreis zwischen dem inneren Strukturelement und den äußeren Aktivitätselementen angeordnet.

Im äußersten Kreis liegen die drei Aktivitätselemente Instanzbasierte Datenerfassung, Bauteilspezifische Datenanalyse und Datenbasierte Use Cases, die in ihrer zeitlichen Chronologie angeordnet sind. Das erste Aktivitätselement ist die Instanzbasierte Datenerfassung, mit der die Zielsetzung verfolgt wird, einen anforderungsgerechten Ansatz zur teil- oder vollautomatisierten Erfassung der Werkzeugkosten und -daten über den gesamten Lebenszyklus unter der Maßgabe, eine möglichst hohe Datenqualität zu erreichen. Aufbauend auf dem Verhaltenselement Instanzbasierte Datenerfassung folgt das Verhaltenselement Bauteilspezifische Datenanalyse. Basierend auf dem anwenderabhängigen Informationsbedarf wird ein Ansatz für die bauteilspezifische Datenanalyse und -auswertung erarbeitet, der zum einen die Entwicklung standardisierter Analyseszenarien im Anwendungszusammenhang und zum anderen die Entwicklung anforderungsgerechter Kennzahlen inklusive Visualisierungskonzept umfasst. Als abschließendes Verhaltenselement folgt das Element Datenbasierte Use Cases. Aufbauend auf den erfassten, analysierten und ausgewerteten Daten beinhaltet es einen Ansatz für die Identifikation, Konzeption und Priorisierung datenbasierter Use Cases zur ganzheitlichen Reduzierung der Werkzeuglebenszykluskosten. Damit ist die Triologie der Aktivitätselemente, die

⁸¹⁰ Vgl. Bleicher (Das Konzept Integriertes Management), 2011, S. 90-91.

das Gestaltungsmodell als äußerster Kreis umspannen, vollständig erläutert. In der nachfolgenden Abbildung 163 ist das Gestaltungsmodell mit den fünf beschriebenen Gestaltungselementen dargestellt.



Abbildung 163: Gestaltungsmodell datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse⁸¹¹

Die Validierung des Gestaltungsmodells zur datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse wird anhand der beiden Fallbeispiele Hilti AG und PWO AG durchgeführt. Die kritische Reflexion zeigt, dass das Gestaltungsmodell die definierten Anforderungen erfüllt und erfolgreich in der Praxis angewendet werden kann. Den Unternehmen steht somit ein Lösungsansatz zur Verfügung, mit dem sie die datenbasierte Werkzeuglebenszykluskostenanalyse gestalten können. Die Gestaltung erfolgt unter Berücksichtigung neuer technologischer Befähiger im Kontext von Industrie 4.0 und dem Digitalen Schatten.

Der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit besteht in der Entwicklung eines ganzheitlichen Lösungsansatzes für die Gestaltung der datenbasierten Analyse der Werkzeuglebenszykluskosten unter Berücksichtigung der sich aus dem Anwendungsfall ergebenden spezifischen Anforderungen. Werkzeugbaubetriebe sind nun gefordert, die Elemente des Gestaltungsmodells betriebspezifisch und unter Berücksichtigung individueller Rahmenbedingungen gemeinsam mit ihren internen und ggf. auch externen Kunden umzusetzen. Gleichzeitig sollte das Thema forschungsseitig insbesondere in den drei folgenden Schwerpunkten weiterentwickelt werden.

Der erste Forschungsschwerpunkt ist die Weiterentwicklung des Modells mit Fokus auf eine nutzen- und wertsteigernde Kreislaufwirtschaft für einzelne Komponenten eines Werkzeugs auf Instanzebene. Durch die Adressierung dieses Forschungsschwerpunkts kann die Wettbewerbsfähigkeit des Werkzeugbaus weiter gezielt gesteigert werden, indem auf Basis weiterer

⁸¹¹ Eigene Darstellung

zu erfassender und auszuwertender Daten der Zustand einer Werkzeugkomponente in Echtzeit bewertet werden kann. Daraufhin kann über die weitere Verwendung der Werkzeugkomponente im gleichen oder einem anderen Werkzeug in Form einer Weiternutzung, einer Wartung, einer Instandhaltung oder eines Upgrades zum Beispiel durch das Auftragen einer hochwertigeren Beschichtung entschieden werden, um die Werkzeugkosten je hergestelltem Teil weiter zu senken.

Den zweiten Forschungsschwerpunkt bildet die Entwicklung eines standardisierten Informationsmodells beispielsweise auf Grundlage des Datenaustauschstandards OPC-Unified Architecture gemeinsam mit Vertretern des Werkzeugbaus, der Serienproduktion, der Werkzeuginstandhaltung sowie der verschiedenen Softwareanbieter von ERP-, PLM- und MES-Systemen. Die praxisorientierte Erforschung eines solchen standardisierten Informationsmodells, die Ableitung einer Spezifikation und die abschließende Zertifizierung schafft die Grundlage für einen standardisierten Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Systemen ohne, dass für den systemübergreifenden Informationsaustausch Sonderprogrammierungen notwendig sind. Insbesondere für die Phase der Werkzeugnutzung unter Beachtung des Werkzeug-Maschine-Systems, z. B. der Kombination aus Umformwerkzeug und Presse, würde die Entwicklung und Umsetzung eines solchen Standards die Verbreitung der datenbasierten Werkzeuglebenszykluskostenanalyse massiv unterstützen.

Der dritte Forschungsschwerpunkt ist die Weiterentwicklung des Wissensmanagementaspekts. In Zukunft wird insbesondere die anforderungsgerechte Bereitstellung von Wissen sowie die nutzerfreundliche Wissensdokumentation über den gesamten Werkzeuglebenszyklus maßgeblich sein, um einen Wettbewerbsvorteil basierend auf den über den Werkzeuglebenszyklus erfassten und ausgewerteten Daten zu erzielen. Im Detail sollte erforscht werden, wie mithilfe künstlicher Intelligenz werkzeuglebenszyklusübergreifendes Wissen anwender- und situationsabhängig bereitgestellt werden kann. Wird beispielsweise ein neues Werkzeug ausgelegt, das Parallelen zu einem bereits außerdienstgestellten Werkzeug aufweist und zu welchem bereits nützliches Wissen abgelegt worden ist, sollte der Konstrukteur automatisch auf dieses Wissen hingewiesen werden. Falls weiteres Wissen vom Nutzer angefordert wird, sollten die bestehenden Dokumente, Zeichnungen und Notizen automatisch durchsucht und eine sinnvolle Zusammenfassung erstellt und dem Nutzer bereitgestellt werden. Ein weiteres Forschungsfeld in diesem Zusammenhang stellt die automatische Überprüfung und Validierung manuell eingegebener Daten entlang des Werkzeuglebenszyklus dar. Wird beispielsweise ein Werkzeugbruch durch einen Anlagenbedienenden kommentiert, kann heute nicht automatisiert der eingegebene Text ausgewertet bzw. hinsichtlich seiner Nützlichkeit beurteilt werden. Eine automatisierte Qualitätsprüfung und Kontaktierung des Mitarbeitenden zur Korrektur seiner Eingabe würde maßgeblich dazu beitragen, den Aussage- und damit den Nutzungswert der erfassten Werkzeuglebenszyklusdaten und -kosten zu steigern.

8 Anhang

Konsortialbenchmarking Effiziente Werkzeugeinstandhaltung

In Ergänzung zu Kapitel 2.4 sind nachfolgend weitere Kennzahlen des Konsortialbenchmar-
kings Effiziente Werkzeugeinstandhaltung abgebildet.

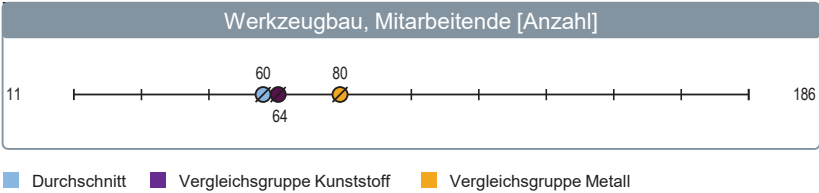


Abbildung 164: KBM – Mitarbeitende im Werkzeugbau⁸¹²

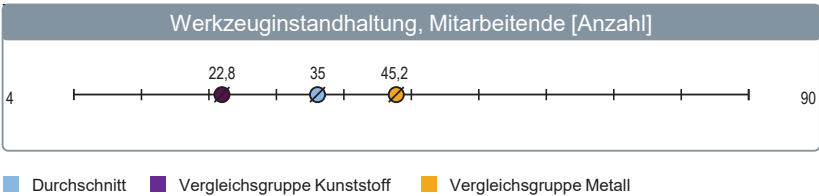


Abbildung 165: KBM – Mitarbeitende Werkzeuginstandhaltung⁸¹³

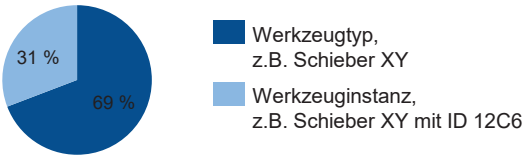


Abbildung 166: KBM – Detaillierungsgrad der Datenerfassung⁸¹⁴

⁸¹² Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

⁸¹³ Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

⁸¹⁴ Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

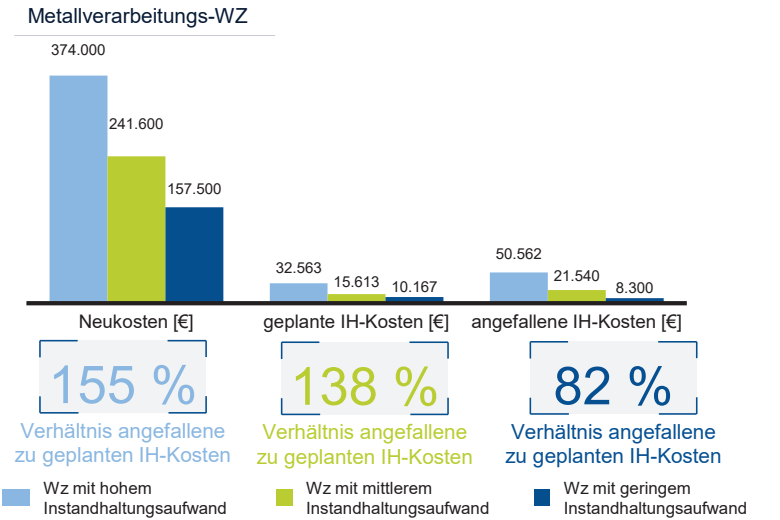


Abbildung 167: KBM – Instandhaltungskosten metallverarbeitende Werkzeuge⁸¹⁵

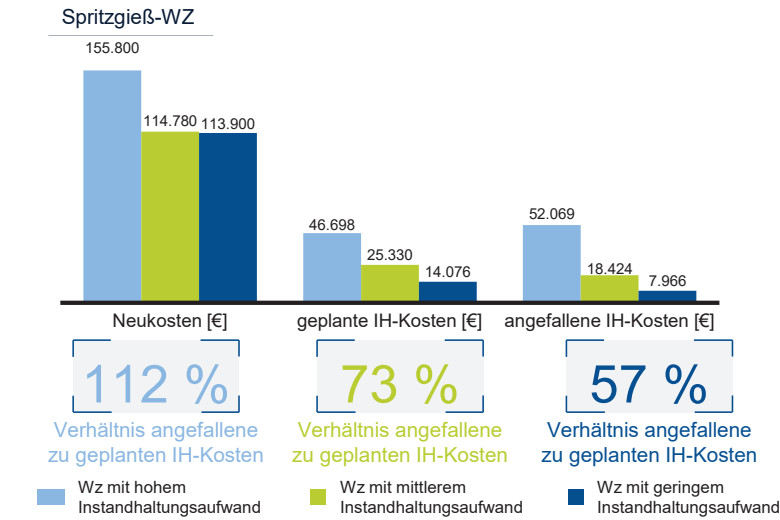


Abbildung 168: KBM – Instandhaltungskosten kunststoffverarbeitende Werkzeuge⁸¹⁶

⁸¹⁵ Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

⁸¹⁶ Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

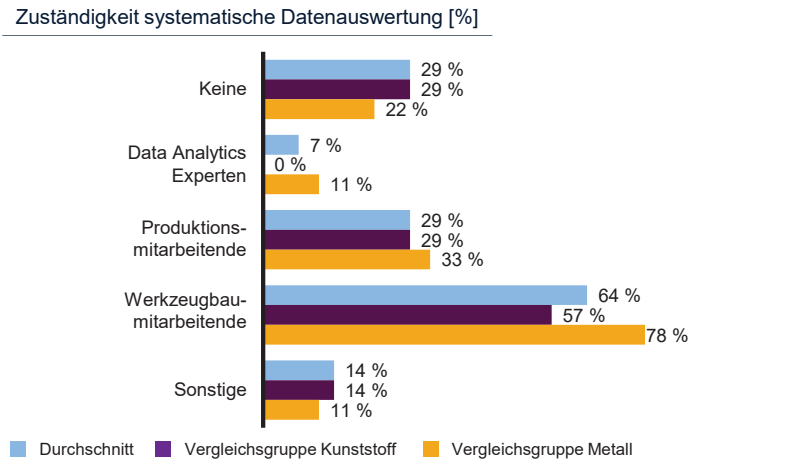


Abbildung 169: KBM – Zuständigkeit Datenauswertung⁸¹⁷

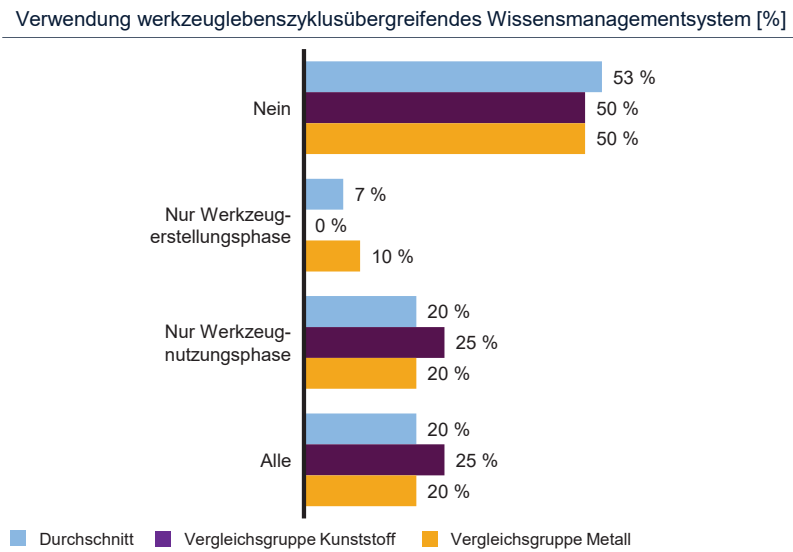


Abbildung 170: KBM – Verwendung Wissensmanagement⁸¹⁸

Datenbasierte Use Cases

⁸¹⁷ Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023
⁸¹⁸ Datenbank des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen, 2023

In Ergänzung zu Kapitel 5.2.3.2 sind nachfolgend weitere Beispiele von Potenzialen inklusive Kurzbeschreibung für ein besseres Verständnis der Thematik abgebildet.


3 – Stammdatendetailierung und -pflege

Kurzbeschreibung


Detailierung und Pflege der Stammdaten auf Instanzebene als Voraussetzung für eine nutzerfreundliche und fehlervermeidende Erfassung von Werkzeuglebenszyklusdaten und -kosten

Abbildung 171: Potenzial 3 inkl. Kurzbeschreibung⁸¹⁹


4 – Erfassung von Werkzeuginstandhaltungsumfängen

Kurzbeschreibung


Ergänzung der MES-Daten in der Serienproduktion durch Instandhaltungstätigkeiten aus dem Werkzeugbau

Abbildung 172: Potenzial 4 inkl. Kurzbeschreibung⁸²⁰


5 – Einbauanleitung

Kurzbeschreibung


Bereitstellung einer Anleitung an der Maschine für das Rüsten der vorliegenden Werkzeuginstanz

Abbildung 173: Potenzial 5 inkl. Kurzbeschreibung⁸²¹


6 – Werkzeugkostenerhebung

Kurzbeschreibung


Erfassung der Werkzeugkosten entlang des Werkzeuglebenszyklus

Abbildung 174: Potenzial 6 inkl. Kurzbeschreibung⁸²²

⁸¹⁹ Eigene Darstellung

⁸²⁰ Eigene Darstellung

⁸²¹ Eigene Darstellung

⁸²² Eigene Darstellung


7 – Anforderungsgerechte Instandhaltungsstrategie

Kurzbeschreibung


Ableitung der anforderungsgerechten Instandhaltungsstrategie für einen Werkzeugtyp

Abbildung 175: Potenzial 7 inkl. Kurzbeschreibung⁸²³


8 – Werkzeugstandmengenoptimierung

Kurzbeschreibung


Optimierung der Standmengen auf Basis der Standmengenabweichungen während des Lebenszyklus

Abbildung 176: Potenzial 8 inkl. Kurzbeschreibung⁸²⁴


9 – Intelligentes Ersatzteilmanagement

Kurzbeschreibung


Beschaffung neuer Ersatzteile abhängig von der durchschnittlichen Standmenge eines Werkzeugs sowie weiterer Parameter

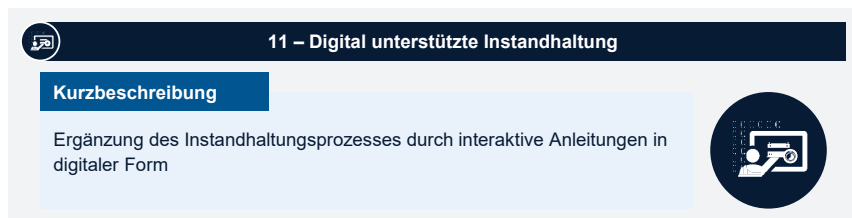
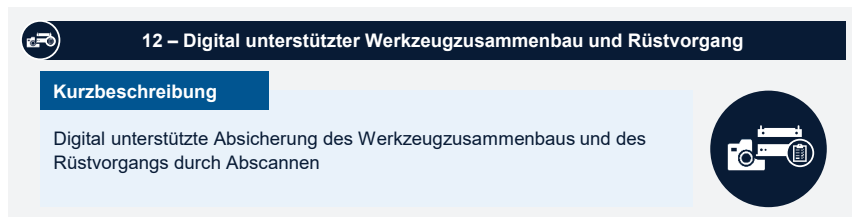
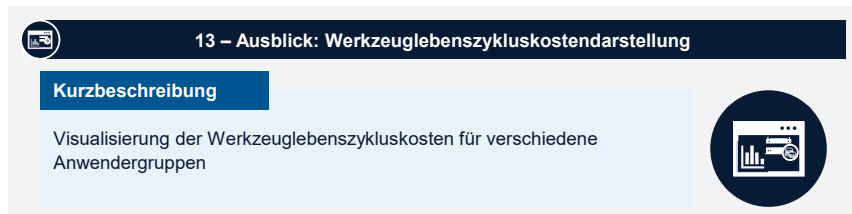
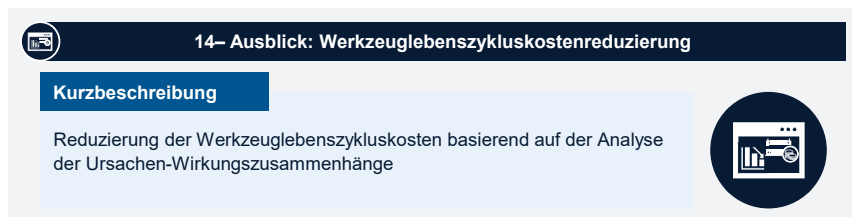
Abbildung 177: Potenzial 9 inkl. Kurzbeschreibung⁸²⁵


10 – Analyse zur Identifizierung von Ursachen-Wirkungszusammenhängen

Kurzbeschreibung


Identifikation von Einflussfaktoren auf die erreichbare Standzeit eines Werkzeugs mit Algorithmen aus dem Data Science

Abbildung 178: Potenzial 10 inkl. Kurzbeschreibung⁸²⁶⁸²³ Eigene Darstellung⁸²⁴ Eigene Darstellung⁸²⁵ Eigene Darstellung⁸²⁶ Eigene Darstellung

Abbildung 179: Potenzial 11 inkl. Kurzbeschreibung⁸²⁷Abbildung 180: Potenzial 12 inkl. Kurzbeschreibung⁸²⁸Abbildung 181: Potenzial 13 inkl. Kurzbeschreibung⁸²⁹Abbildung 182: Potenzial 14 inkl. Kurzbeschreibung⁸³⁰⁸²⁷ Eigene Darstellung⁸²⁸ Eigene Darstellung⁸²⁹ Eigene Darstellung⁸³⁰ Eigene Darstellung


15 – Ausblick: Standzeitprognose auf Instanzebene

Kurzbeschreibung

Prognose der Standmenge für jede einzelne Instanz abhängig von den Einsatzbedingungen



Abbildung 183: Potenzial 15 inkl. Kurzbeschreibung⁸³¹


16 – Ausblick: Intelligenter Vorschlag der einzubauenden Werkzeugkomponente

Kurzbeschreibung

Softwareseitige Optimierung des Werkzeugkomponenteneinsatzes auf Basis der Reststandmenge und der Auftragshistorie



Abbildung 184: Potenzial 16 inkl. Kurzbeschreibung⁸³²


17 – Ausblick: Nutzen- und wertsteigernde Kreislaufwirtschaft

Kurzbeschreibung

Nutzen- und wertsteigernde Kreislaufwirtschaft für Komplettwerkzeuge oder einzelne Werkzeugkomponenten auf Basis der erfassten, analysierten und ausgewerteten Werkzeuglebenszyklusdaten



Abbildung 185: Potenzial 17 inkl. Kurzbeschreibung⁸³³


18 – Ausblick: Darstellung und Reduzierung des CO₂-Äquivalents

Kurzbeschreibung

Darstellung, Auswertung und systematische Reduzierung des angefallenen CO₂-Äquivalents für Komplettwerkzeuge oder einzelne Werkzeugkomponenten für den gesamten Werkzeuglebenszyklus oder einzelne Phasen



Abbildung 186: Potenzial 18 inkl. Kurzbeschreibung⁸³⁴

In Ergänzung zu Kapitel 5.2.3.2 ist nachfolgend ein weiteres Beispiel für ein Use Case Steckbrief für ein besseres Verständnis der Thematik abgebildet.

⁸³¹ Eigene Darstellung⁸³² Eigene Darstellung⁸³³ Eigene Darstellung⁸³⁴ Eigene Darstellung

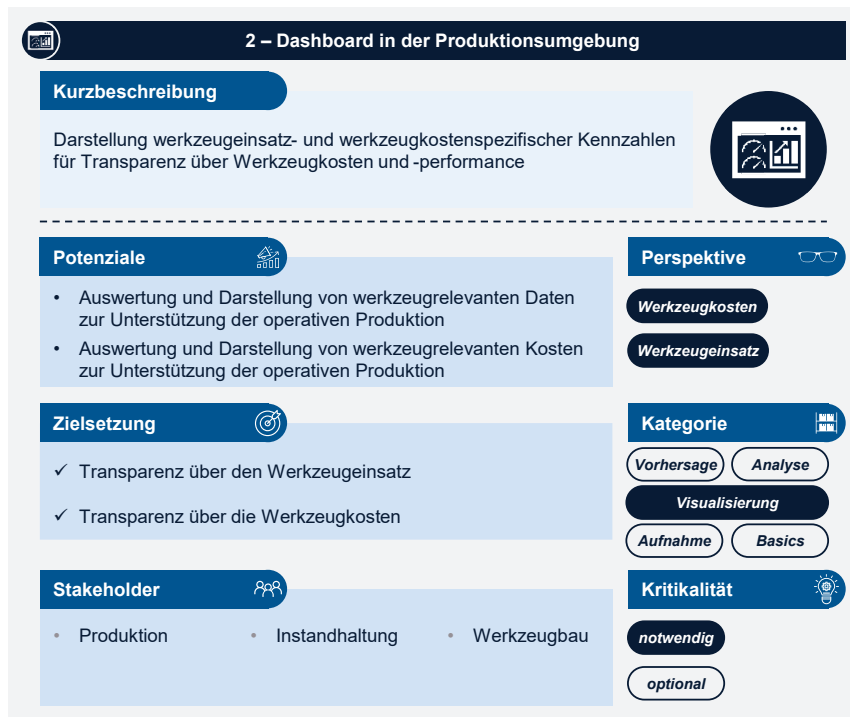


Abbildung 187: Use Case 2 – Dashboard in der Produktionsumgebung⁸³⁵

⁸³⁵ Eigene Darstellung

VII Literaturverzeichnis

Abele, E.; Dervisopoulos, M.; Kuhrke, B. (Bedeutung und Anwendung von Lebenszyklusanalysen bei Werkzeugmaschinen):

Bedeutung und Anwendung von Lebenszyklusanalysen bei Werkzeugmaschinen. In: Schweiger, S. (Hrsg.) Lebenszykluskosten optimieren. Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2009, S. 51–79

Abts, D.; Mülder, W. (Grundkurs Wirtschaftsinformatik):

Grundkurs Wirtschaftsinformatik. Eine kompakte und praxisorientierte Einführung. 9. erweiterte und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.

Adam, K.; Bareis, A.; Birzer, F.; Blasig, N.; Branstetter, R.; Breuer, W.; Frontzek, H.; Weitere (Handbuch der Umformtechnik):

Handbuch der Umformtechnik. (Reihe: Springer eBook Collection). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996.

Akerkar, R. (Artificial intelligence for business):

Artificial intelligence for business. (Reihe: SpringerBriefs in business). Cham: Springer, 2019.

Akerkar, R. (Employing AI in Business):

Employing AI in Business. In: Akerkar, R. (Hrsg.) Artificial Intelligence for Business. (Reihe: SpringerBriefs in business). Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 63–74

Akerkar, R. (Introduction to Artificial Intelligence):

Introduction to Artificial Intelligence. In: Akerkar, R. (Hrsg.) Artificial Intelligence for Business. (Reihe: SpringerBriefs in business). Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 1–18

Alam, D.; Gühl, U. (Projektmanagement für die Praxis):

Projektmanagement für die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020.

Alwosheel, A.; van Cranenburgh, S.; Chorus, C. G. (Is your dataset big enough? Sample size requirements when using artificial neural networks for discrete choice analysis):

Is your dataset big enough? Sample size requirements when using artificial neural networks for discrete choice analysis. In: Journal of Choice Modelling. 28. Jg, 2018, S. 167–182

Ashton, K. (That 'Internet of Things' Thing):

That 'Internet of Things' Thing. In the real world, things matter more than ideas. Online verfügbar unter <https://www.rfidjournal.com/that-internet-of-things-thing-3>, 2009, Stand: 28.05.2022

Balali, F.; Nouri, J.; Nasiri, A.; Zhao, T. (Data Analytics):

Data Analytics. In: Balali, F.; Nouri, J.; Nasiri, A.; Zhao, T. (Hrsg.) Data Intensive Industrial Asset Management. Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 105–113

Balali, F.; Nouri, J.; Nasiri, A.; Zhao, T. (Machine Learning Principles):

Machine Learning Principles. In: Balali, F.; Nouri, J.; Nasiri, A.; Zhao, T. (Hrsg.) Data Intensive Industrial Asset Management. Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 115–157

Bandte, H. (Komplexität in Organisationen):

Komplexität in Organisationen. 1. Aufl. s.l.: DUV Deutscher Universitäts-Verlag, 2007.

Bates, J. (Das Internet der Dinge im industriellen Kontext aus US-amerikanischer Sicht):

Das Internet der Dinge im industriellen Kontext aus US-amerikanischer Sicht. In: Lucks, K. (Hrsg.) Praxishandbuch Industrie 4.0. Branchen - Unternehmen - M&A. 1. Auflage 2017. Freiburg: Schäffer-Poeschel Verlag für Wirtschaft Steuern Recht GmbH, 2017, S. 33–44

Bauer (Architekturen für Web-Anwendungen):

Architekturen für Web-Anwendungen. Eine praxisbezogene Konstruktions-Systematik. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner in GWV Fachverlage GmbH, 2008.

Bauernhansl, T. (Die Vierte Industrielle Revolution):

Die Vierte Industrielle Revolution. Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hrsg.) Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 1–31

Begovic, A. (Datenbasiertes Wissensmanagement für Smart Services im Werkzeugbau):

Datenbasiertes Wissensmanagement für Smart Services im Werkzeugbau. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2017.

Bellatreche, L.; Mohania, M. K. (Bellatreche et al. 2014):

Data Warehousing and Knowledge Discovery. (Reihe: Lecture Notes in Computer Science). Cham: Springer International Publishing, 2014.

Benning, J.; Wenger, L. (Smart-Data-Management):

Smart-Data-Management. In: Schuh, G.; Zeller, V.; Stich, V. (Hrsg.) Digitalisierungs- und Informationsmanagement. Handbuch Produktion und Management 9. 1. Aufl. 2022. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, S. 175–211

Bertalanffy, L. (General system theory):

General system theory. Foundations, development, applications. 1. Auflage. New York: Braziller, 1968.

Bilsing, A. (Kennzahlengestützte Bewertung der technologischen Leistungsfähigkeit):

Kennzahlengestützte Bewertung der technologischen Leistungsfähigkeit. Kennzahlengestützte Bewertung der technologischen Leistungsfähigkeit der Fertigung im Werkzeug- und Formenbau. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2006. (Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik, Bd. 2007,11). Aachen: Shaker, 2007.

Binder, V. A.; Kantowsky, J. (Technologiepotentiale):

Technologiepotentiale. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1996.

BITKOM; VDMA; ZVEI (Umsetzungsstrategie Industrie 4.0):

Umsetzungsstrategie Industrie 4.0. Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0, 2015. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/150410-Umsetzungsstrategie-0.pdf>, Stand: 25.06.2022

Bitkom e. V. (Technologie Trends: Server, Speicher, Netzwerk):

Technologie Trends: Server, Speicher, Netzwerk. Online verfügbar unter https://www.bitkom.org/sites/main/files/2018-12/181212_LF_Technology_Trends%20%283%29.pdf, 2018, Stand: 25.06.2022

Bleicher, K. (Das Konzept Integriertes Management):

Das Konzept Integriertes Management. Visionen - Missionen - Programme. (Reihe: St. Galler Management-Konzept, Bd. 1). 8., aktualis. u. erw. Aufl. Frankfurt am Main: Campus-Verl., 2011.

Block, S. (Datenqualität – Lebenselixier der Digitalisierung):

Datenqualität – Lebenselixier der Digitalisierung. In: Block, S. (Hrsg.) Large-Scale Agile Frameworks. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023, S. 311–332

BMW (Leitbild 2030 für Industrie 4):

Leitbild 2030 für Industrie 4.0. Digitale Ökosysteme global gestalten, 2019.

Bode, J. (Betriebliche Produktion Von Information):

Betriebliche Produktion Von Information. (Reihe: DUV Wirtschaftswissenschaft Ser). Wiesbaden: Deutscher Universitäts Verlag, 1993.

Boos, W. (Methodik zur Gestaltung und Bewertung von modularen Werkzeugen):

Methodik zur Gestaltung und Bewertung von modularen Werkzeugen. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2008.

Boos, W.; Kelzenberg, C.; Goertz, D.; Boshof, J.; Kessler, N.; Haase, B. (Erfolgreich Layout gestalten im Werkzeugbau):

Erfolgreich Layout gestalten im Werkzeugbau. Aachen: WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH; Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2020.

Boos, W.; Kelzenberg, C.; Prümmer, M.; Goertz, D.; Boshof, J.; Horstkotte Rainer; Ochel, T. (Tooling in Germany 2020):

Tooling in Germany 2020. Aachen: WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH; Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2020.

Boos, W.; Kelzenberg, C.; Wiese, J.; Ebbecke, C.; Busch, M.; Bernd, H. (Erfolgreich Planen und Steuern):

Erfolgreich Planen und Steuern. Im Werkzeugbau. Aachen: WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH; Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2019.

Boos, W.; Kelzenberg, C.; Wiese, J.; Kessler, N.; Haase, B. (IT-Infrastruktur zur digitalen Vernetzung im):

IT-Infrastruktur zur digitalen Vernetzung im Werkzeugbau. Aachen: WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH; Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2021.

Boos, W.; Kelzenberg, C.; Wiese, J.; Stracke, F.; Ebbecke, C.; Graberg, T.; Jakubowski, S.; Lapper, S. (Intelligente Werkzeuge und datenbasierte Geschäftsmodelle):

Intelligente Werkzeuge und datenbasierte Geschäftsmodelle. Aachen: WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH; Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2018.

Boos, W.; Lukas, G.; Schweins, J.; Haase, B.; Kenfenheuer, J. (World of Tooling):

World of Tooling. Aachen: WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH; Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2022.

Boos, W.; Salmen, M.; Begovic, A.; Kelzenberg, C.; Stracke, F. (Smart Tooling):

Smart Tooling. Aachen: WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH; Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2016.

Boos, W.; Salmen, M.; Stark, M.; Wiese, J.; Rittstieg, F.; Schultes, T.; Busch, M. (Corporate Tooling):

Corporate Tooling. Flexible Tooling Organization. Aachen: WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH; Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2017.

Boshof, J. (Definition und Auslegung von datenbasierten Dienstleistungen im Werkzeugbau):

Definition und Auslegung von datenbasierten Dienstleistungen im Werkzeugbau. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2022.

Botchkarev, A. (Performance Metrics (Error Measures) in Machine Learning Regression, Forecasting and Prognostics: Properties and Typology):

Performance Metrics (Error Measures) in Machine Learning Regression, Forecasting and Prognostics: Properties and Typology, 2018.

Botkina, D.; Hedlind, M.; Olsson, B.; Henser, J.; Lundholm, T. (Digital Twin of a Cutting Tool):

Digital Twin of a Cutting Tool. In: Procedia CIRP. 72. Jg, 2018, S. 215–218

Böttjer, T.; Ørnskov Rønsch, G.; Gomes, C.; Ramanujan, D.; Iosifidis, A.; Gorm Larsen, P. (Data-Driven Identification of Remaining Useful Life):

Data-Driven Identification of Remaining Useful Life. for Plastic Injection Moulds. In: Andersen, A.-L.; Andersen, R.; Brunoe, T. D.; Larsen, M. S. S.; Nielsen, K.; Napoleone, A.; Kjeldgaard, S. (Hrsg.) Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems. (Reihe: Lecture Notes in Mechanical Engineering). Cham: Springer International Publishing, 2022, S. 431–439

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S. (Digitale Fabrik):

Digitale Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018a.

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S. (Digitale Fabrik):

Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. (Reihe: VDI-Buch). 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018b.

Brandstätter, T. C.; Krauß, J.; Schmitt, R. H. (Certification of AI-Supported Production Processes):

Certification of AI-Supported Production Processes. In: Wulfsberg, J. P.; Hintze, W.; Behrens, B.-A. (Hrsg.) Production at the leading edge of technology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 553–561

Brankamp, K. (Wettbewerbsfaktor Werkzeug- und Betriebsmittelbau):

Wettbewerbsfaktor Werkzeug- und Betriebsmittelbau. (Reihe: Praxisleitfaden für das Management). Zürich: Verl. Industrielle Organisation; Verl. TÜV Rheinland, 1991.

Brenner, D.; Weber, C.; Lenz, J.; Westkaemper, E. (Total Tool Cost of Ownership):

Total Tool Cost of Ownership Indicator. for Holistical Evaluations of Improvement Measures within the Cutting Tool Life Cycle. (Bd. 72), 2018.

Brodie, M. L.; Zilles, S. N. (Data models in database management):

Proceedings of Workshop on Data Abstraction, Databases, and Conceptual Modelling. Pingree Park, Colorado, June 23 - 26, 1980. (Reihe: SIGPLAN notices Special issue, Bd. 16.1981,1). New York, NY: Association for Computing Machinery, 1980.

Brügge, B.; Dutoit, A. H.; Dutoit, A. H. (Object-oriented software engineering):

Object-oriented software engineering. Conquering complex and changing systems. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.

Brunhuber, E. (Praxis der Druckgußfertigung):

Praxis der Druckgußfertigung. 4., neubearb. und erw. Aufl. Berlin: Schiele & Schön, 1991.

Brunkhorst, U. (Integrierte Angebots- und Auftragsplanung im Werkzeug- und Formenbau):

Integrierte Angebots- und Auftragsplanung im Werkzeug- und Formenbau. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 1995. Universität Hannover, Düsseldorf, 1995.

Brunner, E.; Munzel, U. (Nichtparametrische Datenanalyse):

Nichtparametrische Datenanalyse. Unverbundene Stichproben. (Reihe: Statistik und ihre Anwendungen). 2. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

Brunner, F. J.; Wagner, K. W. (Qualität in der Herstellung):

Qualität in der Herstellung. In: Brunner, F. J.; Wagner, K. W. (Hrsg.) Qualitätsmanagement. Leitfaden für Studium und Praxis. (Reihe: Praxisreihe Qualitätswissen). 6., überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2016, S. 191–239

Bruns, M. (Systemtechnik):

Systemtechnik. Ingenieurwissenschaftliche Methodik zur interdisziplinären Systementwicklung. (Reihe: Springer eBook Collection Business and Economics). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hintergrund zur Plattform Industrie 4.0):

Hintergrund zur Plattform Industrie 4.0. Ziel, Struktur und Geschichte der Plattform. Online verfügbar unter <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Plattform/Hintergrund/hintergrund.html>, Stand: 30.04.2022

Bundesverband der Deutschen Industrie e. V.: (Cloud Computing Wertschöpfung in der digitalen Transformation):

Cloud Computing Wertschöpfung in der digitalen Transformation. BDI Leitfaden – Die Industrie auf dem Weg in die „Rechnerwolke“. Industrie-Förderung GmbH. Online verfügbar unter https://bdi.eu/media/presse/publikationen/information-und-telekommunikation/Cloud_Computing.pdf, 2013, Stand: 25.06.2022

Burgess, A. (The Executive Guide to Artificial):

The Executive Guide to Artificial Intelligence. Cham: Springer International Publishing, 2018.

Canis, B. (Tool and Die Industry):

Tool and Die Industry. The Tool and Die Industry. Contribution to US Manufacturing and Federal Policy Considerations. 1. Aufl. Washington, 2012.

Chen, P. P.-S. (The entity-relationship model - toward a unified view of data):

The entity-relationship model - toward a unified view of data. In: ACM Trans. Database Syst. 1. Jg, 1976, Nr. 1, S. 9–36

Chicco, D.; Warrens, M. J.; Jurman, G. (The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation):

The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. In: PeerJ. Computer science. 7. Jg, 2021, e623

Cichy, C.; Rass, S. (An Overview of Data Quality Frameworks):

An Overview of Data Quality Frameworks. In: IEEE Access. 7. Jg, 2019, S. 24634–24648

Codd, E. F. (A relational model of data for large shared data banks):

A relational model of data for large shared data banks. In: Commun. ACM. 13. Jg, 1970, Nr. 6, S. 377–387

Cornuéjols, A.; Wemmert, C.; Gançarski, P.; Bennani, Y. (Collaborative clustering: Why, when, what and how):

Collaborative clustering: Why, when, what and how. In: Information Fusion. 39. Jg, 2018, S. 81–95

Dawes, J. (Do data characteristics change according to the number of scale points used?):

Do data characteristics change according to the number of scale points used? In: International Journal of Market Research. 50. Jg, 2008, Nr. 1, S. 61–77

Deloitte (Industrielles Internet der Dinge und die Rolle von Telekommunikationsunternehmen):

Industrielles Internet der Dinge und die Rolle von Telekommunikationsunternehmen. Hype oder vernetzte Revolution? Online verfügbar unter https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/technology-media-telecommunications/Deloitte_TMT_Industrielles%20Internet%20der%20Dinge.pdf, 2016, Stand: 28.05.2022

Deutscher Bundestag (Internet der Dinge - Aktueller Begriff):

Internet der Dinge - Aktueller Begriff. Online verfügbar unter https://www.bundestag.de/resource/blob/192512/&/internet_der_dinge-data.pdf, 2012, Stand: 28.05.2022

Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN 60300-3-3):

DIN EN 60300-3-3. Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3--3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten (EN 60300--3--3:2004), 2005.

Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN ISO 12100):

DIN EN ISO 12100. Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risiko-beurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010), 2011-03.

Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN EN ISO 31051):

DIN EN ISO 31051. Grundlagen der Instandhaltung (ISO 31051:2012-09), 2019-06.

DFG (Exzellenzcluster 2023: Internet of Production (IoP)):

Exzellenzcluster 2023: Internet of Production (IoP). Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - Projektnummer 390621612, 2018, Stand: 06.05.2023

Dick, M.; Wehner, T. (Wissensmanagement zur Einführung: Bedeutung, Definition, Konzepte):

Wissensmanagement zur Einführung: Bedeutung, Definition, Konzepte. In: Lüthy, W.; Voit, E.; Wehner, T. (Hrsg.) Wissensmanagement-Praxis. Einführung, Handlungsfelder und Fallsbeispiele. Zürich: vdf, 2002, S. 7–27

Dreier, J.; Wehking, K.-H. (Lebenszykluskosten von elektrischen Antriebssystemen):

Lebenszykluskosten von elektrischen Antriebssystemen. In: Logistics Journal, 2016.

Dzombeta, S.; Kalender, A.; Schmidt, S. (Datensicherheit bei Smart Devices und Cloud-Sicherheit und Datenschutz im Cloud Computing):

Datensicherheit bei Smart Devices und Cloud-Sicherheit und Datenschutz im Cloud Computing. In: Schulz, T. (Hrsg.) Industrie 4.0. Potenziale erkennen und umsetzen. 1. Auflage. Würzburg: Vogel Business Media, 2017, S. 281–302

El Morr, C.; Ali-Hassan, H. (Descriptive, Predictive, and Prescriptive Analytics):

Descriptive, Predictive, and Prescriptive Analytics. In: El Morr, C.; Ali-Hassan, H. (Hrsg.) Analytics in Healthcare. (Reihe: SpringerBriefs in Health Care Management and Economics). Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 31–55

Engelhardt et al. (Eigenschaften und Erfolgsfaktoren digitaler Plattformen):

Eigenschaften und Erfolgsfaktoren digitaler Plattformen, 2017.

Engesser, H. (Duden Informatik):

Duden Informatik. Ein Sachlexikon für Studium und Praxis. 2. vollst. überarb. und erw. Aufl. Mannheim: Dudenverl., 1993.

Erpenbeck, J. (Handbuch Kompetenzmessung):

Handbuch Kompetenzmessung. Erkennen, Verstehen und Bewerten von Kompetenzen in der betrieblichen, pädagogischen und psychologischen Praxis. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2007.

Eversheim, W.; Klocke, F. (Werkzeugbau mit Zukunft):

Werkzeugbau mit Zukunft. Strategie und Technologie. (Reihe: Springer eBook Collection Computer Science and Engineering). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998.

Excellence in Production (Rückblick EiP-Wettbewerb):

Rückblick EiP-Wettbewerb. Online verfügbar unter <https://www.excellence-in-production.de/die-preisverleihung/#Rueckblick>, Stand: 16.09.2023

Excellence in Production (Unternehmensprofil Hilti AG):

Unternehmensprofil Hilti AG. Online verfügbar unter <https://www.excellence-in-production.de/die-preisverleihung-backup-1/eip-19-hilti-ag/>, 2019, Stand: 16.09.2023

Fallenbeck, N.; Eckert, C. (IT-Sicherheit und Cloud Computing):

IT-Sicherheit und Cloud Computing. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hrsg.) Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 135–169

Fang, H. (Managing data lakes in big data era):

Managing data lakes in big data era. What's a data lake and why has it become popular in data management ecosystem. In: Tagungsband zum 2015 IEEE International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Shenyang, China, 08.06.2015 - 12.06.2015: IEEE, 2015, S. 820–824

Fasel, D.; Meier, A. (Big Data):

Big Data. (Reihe: Edition HMD). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.

Fayyad, U.; Piatetsky-Shapiro, G.; Smyth, P. (From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases):

From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. In: AI Magazine. 17. Jg, 1996, Nr. 3, S. 1–37

Federowski, R.; Pflanz, C. (Zwischen Hochtechnologie und Handwerkskunst):

Zwischen Hochtechnologie und Handwerkskunst. Deutschlands High-End-Industrie auf Rekordkurs. München, 2017. Online verfügbar unter https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_meisterkreis_1.pdf, Stand: 06.11.2023

Fensel, D. (Internet of Services: Herausforderung und Potenzial):

Internet of Services: Herausforderung und Potenzial. In: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.) Acatech diskutiert: Internet der Dienste, 2011, S. 59–63

Finnegan, D. J.; Willcocks, L. (Implementing CRM):

Implementing CRM. From technology to knowledge. (Reihe: John Wiley series in information systems). Chichester: John Wiley, 2007.

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0; acatech (Industrie 4.0 – Forschung für):

Industrie 4.0 – Forschung für die Gestaltung der Zukunft. Impulsbericht des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0, 2021.

Frades, I.; Matthiesen, R. (Overview on techniques in cluster analysis):

Overview on techniques in cluster analysis. In: Methods in molecular biology (Clifton, N.J.). 593. Jg, 2010, S. 81–107

Frick, L. (Erfolgreiche Geschäftsmodelle im Werkzeugbau):

Erfolgreiche Geschäftsmodelle im Werkzeugbau. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2005. (Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik, Bd. 2006,5). Aachen: Shaker, 2006.

Fricker, I. C. (Strategische Stringenz im Werkzeug- und Formenbau):

Strategische Stringenz im Werkzeug- und Formenbau. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2005. RWTH Aachen, Aachen, 2005.

Friedli, T.; Schuh, G. (Wettbewerbsfähigkeit der Produktion an Hochlohnstandorten):

Wettbewerbsfähigkeit der Produktion an Hochlohnstandorten. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2012.

Gabler Wirtschaftslexikon (Stichwort: Digitalisierung):

Stichwort: Digitalisierung. Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitalisierung-54195/version-384620>, 2021, Stand: 09.05.2022

Gebauer, M.; Windheuser, U. (Strukturierte Datenanalyse, Profiling und Geschäftsregeln):

Strukturierte Datenanalyse, Profiling und Geschäftsregeln. In: Hildebrand, K.; Gebauer, M.; Mielke, M. (Hrsg.) Daten- und Informationsqualität. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 87–100

Gehring, H.; Gabriel, R. (Wirtschaftsinformatik):

Wirtschaftsinformatik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022.

Geisberger, E.; Broy, M. (agendaCPS):

agendaCPS. (Bd. 1). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.

Geis-Thöne, W. (Bildungsstand der Bevölkerung im europäischen Vergleich):

Bildungsstand der Bevölkerung im europäischen Vergleich. Gute Lage, aber schwache Entwicklung in Deutschland. Köln (IW-Report, 3), 2023. Online verfügbar unter https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Report/PDF/2023/IW-Report_2023-Bildungsstand-in-Europa.pdf, Stand: 06.11.2023

Giehler, F. (Erhöhung der Planungsproduktivität):

Erhöhung der Planungsproduktivität. am Beispiel der Auftragsabwicklung im Werkzeugbau. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2010. (Reihe: Edition Wissenschaft Apprimus, Bd. 2010,16). 1. Aufl. Aachen: Apprimus-Verl., 2010.

Gill, M. K.; Asefa, T.; Kaheil, Y.; McKee, M. (Effect of missing data on performance of learning algorithms for hydrologic predictions: Implications to an imputation technique):

Effect of missing data on performance of learning algorithms for hydrologic predictions: Implications to an imputation technique. In: Water Resources Research. 43. Jg, 2007, Nr. 7

Glaessgen, E.; Stargel, D. (The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles):

The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In: 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures

Gölzer, P. (Big Data in Industrie 4.0):

Big Data in Industrie 4.0 Eine strukturierte Aufarbeitung von Anforderungen, Anwendungsfällen und deren Umsetzung. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen, 2017a.

Gölzer, P. (Big Data in Industrie 4.0):

Big Data in Industrie 4.0 Eine strukturierte Aufarbeitung von Anforderungen, Anwendungsfällen und deren Umsetzung. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Nürnberg, 2017b.

Gottschalk, M.; Uslar, M.; Delfs, C. (The Use Case and Smart):

The Use Case and Smart Grid Architecture Model Approach. The IEC 62559-2 Use Case Template and the SGAM Applied in Various Domains. Cham: Springer International Publishing, 2017.

Graberg, T. (Operationalisierung von digitalen Schatten im Werkzeugbau):

Operationalisierung von digitalen Schatten im Werkzeugbau. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2022.

Graham, J. W. (Missing data analysis: making it work in the real world):

Missing data analysis: making it work in the real world. In: Annual review of psychology. 60. Jg, 2009, S. 549–576

Grønning, J. (Planning poker or how to avoid analysis paralysis while release planning):

Planning poker or how to avoid analysis paralysis while release planning. In: Hawthorn Woods: Renaissance Software Consulting. 3. Jg, 2002, 22-23

Grieses, M.; Vickers, J. (Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems):

Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, F.-J.; Flumerfelt, S.; Alves, A. (Hrsg.) Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 85–113

Grover, P.; Kar, A. K. (Big Data Analytics: A Review on Theoretical Contributions and Tools Used in Literature):

Big Data Analytics: A Review on Theoretical Contributions and Tools Used in Literature. In: Glob J Flex Syst Manag. 18. Jg, 2017, Nr. 3, S. 203–229

Gualo, F.; Rodriguez, M.; Verdugo, J.; Caballero, I.; Piattini, M. (Data quality certification using ISO/IEC 25012: Industrial experiences):

Data quality certification using ISO/IEC 25012: Industrial experiences. In: Journal of Systems and Software. 176. Jg, 2021, S. 1–17

Guba, E. G.; Lincoln, Y. S. (Competing paradigms in qualitative research):

Competing paradigms in qualitative research. In: Denzin, N. K.; Lincoln, Y. S. (Hrsg.) Handbook of Qualitative Research. Thousand Oaks: Sage Publications Inc., 1994, S. 105–117

Günther, T.; Kriegbaum C. (Life Cycle Costing):

Life Cycle Costing. In: WISU Das Wirtschaftsstudium. (Bd. 10/1997): Lange Verlag Düsseldorf, 1997, S. 900–912

Gutenberg, E. (Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre):

Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1951.

Güting, R. H. (Einführung):

Einführung. In: Güting, R. H. (Hrsg.) Datenstrukturen und Algorithmen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1992, S. 1–34

Haberfellner, R.; Weck, O. L. de; Fricke, E.; Vössner, S. (Systems Engineering):

Systems Engineering. Fundamentals and Applications. (Reihe: Springer eBook Collection). Cham: Birkhäuser, 2019.

Hahne, M. (Logische Modellierung mehrdimensionaler Datenbanksysteme):

Logische Modellierung mehrdimensionaler Datenbanksysteme. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2002.

Han, J.; Kamber, M.; Pei, J. (Data mining):

Data mining. Concepts and techniques. 3rd ed (Online-Ausg.). Amsterdam: Elsevier Morgan Kaufmann, 2011.

Hapfelmeier, A.; Ulm, K. (Variable selection by Random Forests using data with missing values):

Variable selection by Random Forests using data with missing values. In: Computational Statistics & Data Analysis. 80. Jg, 2014, S. 129–139

Hassenstein, M. J.; Vanella, P. (Data Quality—Concepts and Problems):

Data Quality—Concepts and Problems. In: Encyclopedia. 2. Jg, 2022, Nr. 1, S. 498–510

Heinen, E. (Entwicklungstendenzen in der entscheidungsorientierten Betriebswirtschaftslehre):

Entwicklungstendenzen in der entscheidungsorientierten Betriebswirtschaftslehre. In: Die Unternehmung, 1971, 89–99

Hensen, T. (Strategische Auslegung industrieller Werkzeugbaubetriebe):

Strategische Auslegung industrieller Werkzeugbaubetriebe. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2017.

Herrmann, C. (Lebensphasenübergreifende Disziplinen):

Lebensphasenübergreifende Disziplinen. In: Herrmann, C. (Hrsg.) Ganzheitliches Life Cycle Management. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 131–234

Herrmann, C.; Spengler, T. (Industriearmaturen – Was kosten sie wirklich):

Industriearmaturen – Was kosten sie wirklich. In: VDMA Nachrichten, 2006, S. 36–38

Hienzsch, M.; Kuhn, T.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Forecasting life-cycle costs of high quality tools):

Forecasting life-cycle costs of high quality tools. In: Tagungsband zum 2014 IEEE International Technology Management Conference (ITMC). Chicago, IL, USA, 12.06.2014 - 15.06.2014: IEEE, 2014, S. 1–4

Hildebrand, K.; Gebauer, M.; Mielke, M. (Daten- und Informationsqualität):

Daten- und Informationsqualität. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.

Hilti AG (Unternehmensbericht 2020):

Unternehmensbericht 2020. Online verfügbar unter https://www.hilti.group/content/dam/documents/Media-Release/2021/march/Hilti_GB_2020_de_pdf.pdf, 2020, Stand: 16.09.2023

Hilti AG (Finanzbericht 2022):

Finanzbericht 2022. Online verfügbar unter <https://www.hilti.group/content/dam/documents/Media-Release/company-report/hilti-finance-report.pdf>, 2022, Stand: 16.09.2023

Hilti AG (Firmengeschichte):

Firmengeschichte. Online verfügbar unter <https://www.hilti.de/content/hilti/E3/DE/de/company/corporate-information/company-profile/history.html>, 2023, Stand: 16.09.2023

Hilti AG (Produktionsstätten):

Produktionsstätten. Online verfügbar unter <https://www.hilti.de/content/hilti/E3/DE/de/company/corporate-information/production-locations.html>, 2023, Stand: 16.09.2023

Hilti AG (Über Hilti):

Über Hilti. Online verfügbar unter <https://www.hilti.de/content/hilti/E3/DE/de/company/corporate-information/company-profile/about-us.html>, 2023, Stand: 16.09.2023

Hintze, J. L.; Nelson, R. D. (Violin Plots: A Box Plot-Density Trace Synergism):

Violin Plots: A Box Plot-Density Trace Synergism. In: The American Statistician. 52. Jg, 1998, Nr. 2, S. 181–184

Holmes, J.; Rutherford, T.; Fitzgibbon, S. (Innovation in the automotive tool, die and mould industry):

Innovation in the automotive tool, die and mould industry. In: Network Structure of An Industrial Cluster, 2005, S. 119–154

International Institute for Management Development (World Competitiveness Booklet 2023):

World Competitiveness Booklet 2023, 2023. Online verfügbar unter https://www.imd.org/wp-content/uploads/2023/06/WCY_Booklet_2023-FINAL.pdf, Stand: 06.11.2023

International Labour Office (Global Wage Report 2022-23):

Global Wage Report 2022-23. The Impact of Inflation and COVID-19 on Wages and Purchasing Power. (Reihe: Global Wage Report). 1st ed. Geneva: International Labour Organisation (ILO), 2022.

International Organization for Standardization (International Organization for Standardization 1985):

ISO 5807:1985. Information processing - Documentation symbols and conventions for data, program and system flowcharts, program network charts and system resources charts. Schweiz, 1985.

Ishikawa, K. (Guide to quality control):

Guide to quality control. Tokyo, 1981.

ISO/IEC, (ISO/IEC 25024):

ISO/IEC 25024. Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (ISO/IEC 25024), 2015-10.

ISO/IEC JTC 1 Information technology, (ISO/IEC 19505-2):

ISO/IEC 19505-2. Information technology — Object Management Group Unified Modeling Language (OMG UML), 2012.

Jacob, O. (ERP Value):

ERP Value. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

Jadhav, A.; Pramod, D.; Ramanathan, K. (Comparison of Performance of Data Imputation Methods for Numeric Dataset):

Comparison of Performance of Data Imputation Methods for Numeric Dataset. In: Applied Artificial Intelligence. 33. Jg, 2019, Nr. 10, S. 913–933

Jaekel, M. (Die Macht der digitalen Plattformen):

Die Macht der digitalen Plattformen. Wegweiser im Zeitalter einer expandierenden Digitalsphäre und künstlicher Intelligenz. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.

Jähnichen, S. (Von Big Data zu Smart):

Von Big Data zu Smart Data – Herausforderungen für die Wirtschaft (Von Big Data zu Smart Data, 1), 2015. Online verfügbar unter https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/SmartData_NL1.pdf%3F__blob%3Dpublication-File%26v%3D5https://plattform-digitale-netze.de/app/uploads/2016/06/151103_PF1_007_FG2_Smart_Data_fuer_IM_kurz.pdf, Stand: 26.11.2022

Jain, A.; Patel, H.; Nagalapatti, L.; Gupta, N.; Mehta, S.; Guttula, S.; Mujumdar, S.; Afzal, S.; Sharma Mittal, R.; Munigala, V. (Overview and Importance of Data Quality for Machine Learning Tasks):

Overview and Importance of Data Quality for Machine Learning Tasks. In: Tagungsband zum KDD '20: The 26th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Virtual Event CA USA, 06 07 2020 10 07 2020. New York, NY, USA: ACM, 2020, S. 3561–3562

Jain, A. K.; Chandrasekaran, B. (39 Dimensionality and sample size considerations in pattern recognition practice):

39 Dimensionality and sample size considerations in pattern recognition practice. In: Classification Pattern Recognition and Reduction of Dimensionality. (Reihe: Handbook of Statistics): Elsevier, 1982, S. 835–855

Jeffries, R. E.; Anderson, A.; Hendrickson, C. (Extreme Programming installed):

Extreme Programming installed. (Reihe: Programmer's choice). München: Addison-Wesley, 2001.

Junger, W. L.; Ponce de Leon, A. (Imputation of missing data in time series for air pollutants):

Imputation of missing data in time series for air pollutants. In: Atmospheric Environment. 102. Jg, 2015, S. 96–104

Kagermann, H.; Lukas, W.-D.; Wahlster, W. (Industrie 4.0):

Industrie 4.0. Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. In: VDI Nachrichten, 2011, Nr. 11, S. 2

Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftprojekt Industrie):

Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Eine Studie der acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013. Online verfügbar unter <https://www.acatech.de/publikation/umsetzungsempfehlungen-fuer-das-zukunftsprojekt-industrie-4-0-abschlussbericht-des-arbeitskreises-industrie-4-0/download-pdf/?lang=de>, Stand: 29.04.2022

Kamiske, G. F.; Brauer, J.-P. (Qualitätsmanagement von A bis Z):

Qualitätsmanagement von A bis Z. Erläuterungen moderner Begriffe des Qualitätsmanagements. 3., vollst. überarb. und erw. Aufl. München: Hanser, 1999.

Kang, H. (The prevention and handling of the missing data):

The prevention and handling of the missing data. In: Korean journal of anesthesiology. 64. Jg, 2013, Nr. 5, S. 402–406

Kelzenberg, C. (Datenstrukturmodell für den digitalen Schatten):

Datenstrukturmodell für den digitalen Schatten. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2020.

Kemper, A.; Eickler, A. (Datenbanksysteme):

Datenbanksysteme. Eine Einführung. 8., aktualisierte und erw. Aufl. München: Oldenbourg, 2011.

Kemper, A.; Eickler, A. (Datenbanksysteme):

Datenbanksysteme. Eine Einführung. (Reihe: De Gruyter Oldenbourg Studium). 10., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2015.

Kern, E.-M.; Müller, J. C. (Digitales Wissensmanagement oder die Frage: Kann Wissen online gemanagt werden?):

Digitales Wissensmanagement oder die Frage: Kann Wissen online gemanagt werden? In: Kollmann, T. (Hrsg.) Handbuch Digitale Wirtschaft. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 1–21

Kett, I. (Management Skills):

Management Skills. Beziehungen nutzen, Probleme lösen, effektiv kommunizieren. (Reihe: SpringerLink Bücher). Wiesbaden: Gabler, 2010.

Klein, B. (FEM):

FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.

Kleinemeier, M. (Von der Automatisierungspyramide zu Unternehmenssteuerungs-Netzwerken):

Von der Automatisierungspyramide zu Unternehmenssteuerungs-Netzwerken. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hrsg.) Handbuch Industrie 4.0 Bd.1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 219–226

Kleuker, S. (Formale Modelle der Softwareentwicklung):

Formale Modelle der Softwareentwicklung. Model-Checking, Verifikation, Analyse und Simulation. (Reihe: Datenbanken und Softwareentwicklung). 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009.

Kleuker, S. (Grundkurs Software-Engineering mit UML):

Grundkurs Software-Engineering mit UML. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.

Klocke, F.; Arntz, K. (Technologien für den Werkzeug- und Formenbau von morgen):

Technologien für den Werkzeug- und Formenbau von morgen. In: Klocke, F.; Eversheim, W. (Hrsg.) 4. Internationales Kolloquium Werkzeugbau mit Zukunft, 2004, S. 1–26

Klocke, F.; Schuh, G.; Zohm, F.; Fricker, I. C.; Sauer, A.; Wegehaupt, P. (Zukunftsstudie Werkzeug- und Formenbau):

Zukunftsstudie Werkzeug- und Formenbau. Aachen: WZL, 2005.

Klotzbach, C. (Gestaltungsmodell für den industriellen Werkzeugbau):

Gestaltungsmodell für den industriellen Werkzeugbau. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2007.

Knight, K.; Rich, E.; Nair, S. (Artificial Intelligence):

Artificial Intelligence. Indien: Gardners Books, 2009.

Knoll; Rinderle-Ma (Plattformen – Eine Einführung):

Plattformen – Eine Einführung. In: HMD. 52. Jg, 2015, Nr. 3, S. 322–336

Komorek, N. J. (Gestaltungsmodell für kollaborative Wertschöpfung im industriellen Werkzeugbau):

Gestaltungsmodell für kollaborative Wertschöpfung im industriellen Werkzeugbau. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2014.

Kompetenzzentrum innovative Beschaffung (Lebenszyklus-Tool-Picker):

Lebenszyklus-Tool-Picker. Online verfügbar unter <https://www.koinno-bmwi.de/informationen/toolbox/detail/lebenszyklus-tool-picker-1/>, 2016, Stand: 04.01.2021

Krcmar (Einführung in das Informationsmanagement):

Einführung in das Informationsmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.

Krcmar, H. (Informationsmanagement):

Informationsmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.

Krogh, G.; Venzin, M. (Anhaltende Wettbewerbsvorteile durch Wissensmanagement):

Anhaltende Wettbewerbsvorteile durch Wissensmanagement. In: Die Unternehmung, 1995, Nr. 49, S. 417–436

Kubach, U. (Device Clouds: Cloud-Plattformen schlagen die Brücke zwischen Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge):

Device Clouds: Cloud-Plattformen schlagen die Brücke zwischen Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hrsg.) Handbuch Industrie 4.0 Bd.3. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 181–200

Kubicek, H. (Heuristische Bezugsrahmen):

Heuristische Bezugsrahmen. und heuristisch angelegte Forschungsdesign als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung. (Reihe: Arbeitspapier / Institut für Unternehmungsführung im Fachbereich Wirtschaftswissenschaft der Freien Universität Berlin, Bd. Nr. 16). Berlin: Inst. für Unternehmungsführung im Fachbereich Wirtschaftswiss. d. Freien Univ, 1977.

Kuhn, T. S. (Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen):

Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. (Reihe: Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft, Bd. 25). 2., rev. und um das Postskriptum von 1969 erg. Aufl. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1976.

Kuhn, T. S. (Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen):

Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. (Reihe: Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft 25). 2., rev. u. um d. Postskriptum von 1969 erg. Aufl., 9. Aufl. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1988.

Kühn, T. (Lebenszyklusorientierte Leistungssysteme im Werkzeugbau):

Lebenszyklusorientierte Leistungssysteme im Werkzeugbau. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2016.

Kühne, T. (Matters of (Meta-) Modeling):

Matters of (Meta-) Modeling. In: Softw Syst Model. 5. Jg, 2006, Nr. 4, S. 369–385

Kurbel, K. E. (Enterprise Resource Planning and Supply):

Enterprise Resource Planning and Supply Chain Management. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

Kurpjuweit, S. (Stakeholder-orientierte Modellierung und Analyse der Unternehmensarchitektur):

Stakeholder-orientierte Modellierung und Analyse der Unternehmensarchitektur. Unter besonderer Berücksichtigung der Geschäfts- und IT-Architektur. Zugl.: St. Gallen, Univ., Diss., 2009. Berlin: Logos-Verl., 2009.

Lee, Y. W.; Pipino, L. L.; Funk, J. D.; Wang, R. Y. (Journey to data quality):

Journey to data quality. Cambridge, Mass: MIT Press, 2006.

Lehner, F. (Wissensmanagement):

Wissensmanagement. Grundlagen, Methoden und technische Unterstützung. 7. Aufl. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2021.

Lehner, F.; Wildner, S.; Scholz, M. (Wirtschaftsinformatik):

Wirtschaftsinformatik. Eine Einführung. 2. Aufl. München: Hanser, 2008.

Li, Y.; Manoharan, S. (A performance comparison of SQL and NoSQL databases):

A performance comparison of SQL and NoSQL databases. In: Tagungsband zum 2013 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM). Victoria, BC, Canada, 27.08.2013 - 29.08.2013: IEEE, 2013, S. 15–19

Lichtblau (Plattformen - Infrastruktur der Digitalisierung):

Plattformen - Infrastruktur der Digitalisierung. Online verfügbar unter https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2019/Downloads/Plattformen-Infrastruktur-der-Digitalisierung_final_neu.pdf, 2019, Stand: 30.04.2022

Likert, R. (Measurement of Attitudes):

Measurement of Attitudes. A Technique for the measurement of attitudes. In: Archives of Psychology. 22. Jg, 1932, Nr. 140, S. 5–55

Lisowski, R. (Das asiatische Jahrhundert - dreht sich die Welt falsch?):

Das asiatische Jahrhundert - dreht sich die Welt falsch? Eine Antwort auf Kishore Mahbubani. (Reihe: Politik & Kultur, Bd. Band 14). Berlin: LIT, 2019.

Lucke, D.; Görzig, D.; Kacir, M.; Volkmann, J.; Haist, C.; Sachsenmaier, M.; Rentschler, H. (Strukturstudie „Industrie 4.0 für Baden-Württemberg“):

Strukturstudie „Industrie 4.0 für Baden-Württemberg“. Baden-Württemberg auf dem Weg zu Industrie 4.0. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, 2014.

Marcelino, C. G.; Leite, G. M. C.; Celes, P.; Pedreira, C. E. (Missing Data Analysis in Regression):

Missing Data Analysis in Regression. In: Applied Artificial Intelligence. 36. Jg, 2022, Nr. 1, S. 2158–2182

Martinez-Plumed, F.; Contreras-Ochando, L.; Ferri, C.; Hernandez Orallo, J.; Kull, M.; Lachiche, N.; Ramirez Quintana, M. J.; Flach, P. A. (CRISP-DM Twenty Years Later):

CRISP-DM Twenty Years Later. From Data Mining Processes to Data Science Trajectories. In: IEEE Trans. Knowl. Data Eng., 2020, S. 1

Martins, F.; Kobylinska, A. (IoT-Basics):

IoT-Basics. Was bedeutet Edge Computing? Online verfügbar unter <https://www.industry-of-things.de/iot-basics-was-bedeutet-edge-computing-a-678225/>, 2019, Stand: 26.05.2022

Mathar, R.; Alirezaei, G.; Balda, E.; Behboodi, A. (Fundamentals of Data Analytics):

Fundamentals of Data Analytics. Cham: Springer International Publishing, 2020.

Mattes, K.; Schröter, M. (Wirtschaftlichkeitsbewertung):

Wirtschaftlichkeitsbewertung. Bewertung der wirtschaftlichen Potenziale von energieeffizienten Anlagen und Maschinen - Kurzstudie. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2012.

Matthes (Enterprise Architecture Frameworks Kompendium):

Enterprise Architecture Frameworks Kompendium. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

Mauro, A. de; Greco, M.; Grimaldi, M. (A formal definition of Big Data):

A formal definition of Big Data. Based on its essential features. In: Library Review. 65. Jg, 2016, Nr. 3, S. 122–135

Meier, A. (Relationale und postrelationale Datenbanken):

Relationale und postrelationale Datenbanken. (Reihe: eXamen.press). 6., überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2007.

Meier, A.; Kaufmann, M. (Datenmanagement):

Datenmanagement. In: Meier, A.; Kaufmann, M. (Hrsg.) SQL- & NoSQL-Datenbanken. (Reihe: eXamen.press). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 1–24

Meise, V. (Ordnungsrahmen zur prozessorientierten Organisationsgestaltung):

Ordnungsrahmen zur prozessorientierten Organisationsgestaltung. Modelle für das Management komplexer Reorganisationsprojekte. Zugl.: Münster (Westfalen), Univ., Diss., 2000. (Reihe: Schriftenreihe Studien zur Wirtschaftsinformatik, Bd. 10). Hamburg: Kovač, 2001.

Mell, P. M.; Grance, T. (The NIST Definition of Cloud Computing):

The NIST Definition of Cloud Computing. Online verfügbar unter <https://nvl-pubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>, 2011, Stand: 25.06.2022

Menges, G.; Michaeli, W.; Mohren, P. (Spritzgießwerkzeuge):

Spritzgießwerkzeuge. Auslegung, Bau, Anwendung; mit 63 Tabellen. 6. Aufl. München: Hanser, 2007.

Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S.; Reinhart, G.; Sauer, O.; Schuh, G.; Sihn, W.; Ueda, K. (Cyber-physical systems in manufacturing):

Cyber-physical systems in manufacturing. In: CIRP Annals. 65. Jg, 2016, Nr. 2, S. 621–641

Müller, A.; Bornschlegel, M.; Mantwill, F.; Bregulla, M. (Lebenszykluskosten in der Digitalen Fabrik):

Lebenszykluskosten in der Digitalen Fabrik. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 111. Jg, 2016, Nr. 5, S. 251–255

Müller, S. (Erweiterung des Data Warehouse um Hadoop, NoSQL & Co):

Erweiterung des Data Warehouse um Hadoop, NoSQL & Co. In: Fasel, D.; Meier, A. (Hrsg.) Big Data. (Reihe: Edition HMD). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 139–158

Munz, H.; Stöger, G. (Deterministische Machine-to-Machine Kommunikation im Industrie 4.0 Umfeld):

Deterministische Machine-to-Machine Kommunikation im Industrie 4.0 Umfeld. In: Schulz, T. (Hrsg.) Industrie 4.0. Potenziale erkennen und umsetzen. 1. Auflage. Würzburg: Vogel Business Media, 2017, S. 69–86

Nakajima, S. (Introduction to TPM):

Introduction to TPM. Total productive maintenance. Cambridge, Mass.: Productivity Press, 1988.

Neemann, C. W. (Methodik zum Schutz gegen Produktimitationen):

Methodik zum Schutz gegen Produktimitationen. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2007. (Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik, Bd. Bd. 2007,13). Aachen: Shaker, 2007.

Niebler, P.; Lindner, D. (Datenbasiert entscheiden):

Datenbasiert entscheiden. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022.

Nonaka, I.; Takeuchi, H. (Die Organisation des Wissens):

Die Organisation des Wissens. Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen. 2. Aufl. Frankfurt am Main: Campus Verlag GmbH, 2012.

North, K. (Wissensorientierte Unternehmensführung):

Wissensorientierte Unternehmensführung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.

North, K.; Maier, R. (Wissen 4.0 – Wissensmanagement im digitalen Wandel):

Wissen 4.0 – Wissensmanagement im digitalen Wandel. In: HMD. 55. Jg, 2018, Nr. 4, S. 665–681

Offensive Mittelstand - Gut für Deutschland (Umsetzungshilfen Arbeit 4.0):

Umsetzungshilfen Arbeit 4.0. Künstliche Intelligenz für die produktive und präventive Arbeitsgestaltung nutzen: Hintergrundwissen und Gestaltungsempfehlungen zur Einführung der 4.0-Technologien. Heidelberg: Stiftung „Mittelstand – Gesellschaft – Verantwortung“, 2019.

Olson, D. L.; Wu, D. (Knowledge Management):

Knowledge Management. In: Olson, D. L.; Wu, D. (Hrsg.) Predictive Data Mining Models. (Reihe: Computational Risk Management). Singapore: Springer Singapore, 2017, S. 1–7

Parker et al. (Die Plattform-Revolution):

Die Plattform-Revolution. Von Airbnb, Uber, PayPal und Co. lernen: wie neue Plattform-Geschäftsmodelle die Wirtschaft verändern : Methoden und Strategien für Unternehmen und Start-ups. 1. Auflage. Frechen: mitp Verlags GmbH & Co. KG, 2017.

Patzak, G. (Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme):

Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken. Berlin: Springer, 1982.

Paulukuhn, L. (Typologisierung von Entwicklungsprojekten im Maschinenbau):

Typologisierung von Entwicklungsprojekten im Maschinenbau. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2004. (Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik, Bd. 2005,1). Aachen: Shaker, 2005.

Pawlowsky, P. (Wissensmanagement):

Wissensmanagement. Berlin/Boston: De Gruyter Oldenburg, 2019.

Pistorius, J. (Industrie 4.0 - Schlüsseltechnologien für die Produktion):

Industrie 4.0 - Schlüsseltechnologien für die Produktion. Grundlagen * Potenziale * Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2020.

Pitsch, M. (Kompetenzfeldbasierte Vernetzung von Werkzeugbaustandorten):

Kompetenzfeldbasierte Vernetzung von Werkzeugbaustandorten. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2014.

Polanyi, M. (The tacit dimension):

The tacit dimension. London: Routledge & Kegan Paul, 1966.

Pongratz et al. (Prozessorientierte Wirtschaftsdidaktik und Einsatz von ERP-Systemen):

Prozessorientierte Wirtschaftsdidaktik und Einsatz von ERP-Systemen. 4. Jg, 2009.

Popper, K. R. (Die Logik der Sozialwissenschaften):

Die Logik der Sozialwissenschaften. In: Adorno, T.; Dahrendorf, R.; Pilot, H.; Albert, H.; Habermas, J.; Popper, K. (Hrsg.) Die Logik der Sozialwissenschaften. 4. Aufl.: Hermann Luchterhand, 1975, S. 103–123

Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K. (Wissen managen):

Wissen managen. Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. 7. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012.

PWO AG (Geschäftsbericht 2022):

Geschäftsbericht 2022. Online verfügbar unter https://www.pwo-group.com/media/docs/investoren-und-presse/geschaeftsbericht/2022/GB_2022_DE_Vollstaendig_safe.pdf, 2022, Stand: 16.09.2023

PWO AG (Unternehmensgeschichte):

Unternehmensgeschichte. Online verfügbar unter <https://www.pwo-group.com/de/konzern/unternehmensgeschichte/?navid=268549268549>, 2023, Stand: 16.09.2023

Rahul, K.; Banyal, R. K. (Data Life Cycle Management in Big Data Analytics):

Data Life Cycle Management in Big Data Analytics. In: Procedia Computer Science. 173. Jg, 2020, S. 364–371

Raja, B.; Pamina, J.; Madhavan, P.; Kumar, A. S. (Market Behavior Analysis using Descriptive Approach):

Market Behavior Analysis using Descriptive Approach. In: SSRN Journal, 2019, S. 171–175

Rehäuser, J.; Krcmar, H. (Wissensmanagement in Unternehmen):

Wissensmanagement in Unternehmen. In: Schreyögg, G.; Conrad, P. (Hrsg.) Managementforschung 6. Berlin: De Gruyter, 1996, S. 1–40

Reinmann-Rothmeier, G. (Wissensmanagement lernen):

Wissensmanagement lernen. Ein Leitfaden zur Gestaltung von Workshops und zum Selbstlernen. (Reihe: Beltz Weiterbildung). Weinheim: Beltz, 2001.

Reinsch, S.; Eger, M. (Life Cycle Costs):

Life Cycle Costs. Leitfaden zur Verknüpfung von Angebotskalkulation und Lebenszykluskostenrechnung für Erzeugnisse des Werkzeug- und Formenbaus. 1. Auflage. Frankfurt am Main (FQS-DGQ-Schriftenreihe, 84-06), 2006.

Riesener, M.; Dölle, C.; Schuh, G.; Tönnies, C. (Framework for defining information quality based on data attributes within the digital shadow using LDA):

Framework for defining information quality based on data attributes within the digital shadow using LDA. In: Procedia CIRP. 83. Jg, 2019, S. 304–310

Rohweder, J. P.; Kasten, G.; Malzahn, D.; Piro, A.; Schmid, J. (Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe):

Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe. In: Hildebrand, K.; Gebauer, M.; Mielke, M. (Hrsg.) Daten- und Informationsqualität. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 23–43

Rollins, J. (Foundational Methodology for Data Science):

Foundational Methodology for Data Science. IBM Analytics. IBM Corporation. New York, 2015. Online verfügbar unter <https://tdwi.org/~media/64511A895D86457E964174EDC5C4C7B1.PDF>, Stand: 13.12.2022

Ropohl, G. (Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik):

Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik: Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.

Rosen, R.; Wichert, G.; Lo, G.; Bettenhausen, K. D. (About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing):

About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. In: IFAC-PapersOnLine. 48. Jg, 2015, Nr. 3, S. 567–572

Runkler, T. A. (Data Analytics):

Data Analytics. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.

Russell, S. J.; Norvig, P. (Artificial intelligence):

Artificial intelligence. A modern approach. (Reihe: Always learning). Third edition, Global edition. Boston: Pearson, 2016.

Salgado, C. M.; Azevedo, C.; Proença, H.; Vieira, S. M. (Secondary Analysis of Electronic Health):

Secondary Analysis of Electronic Health Records. Missing Data. Cham (CH), 2016.

Salmen, M. (Gestaltungsmodell für den digital vernetzten Shopfloor im Werkzeugbau):

Gestaltungsmodell für den digital vernetzten Shopfloor im Werkzeugbau. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2016.

Schanz (Wissenstheoretische Grundfragen der Führungsforschung):

Wissenstheoretische Grundfragen der Führungsforschung. In: Kieser, A. (Hrsg.) Handwörterbuch der Führung. HWFü. (Reihe: Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre, Bd. 10). Stuttgart: Poeschel, 1987, S. 2039

Schatz, A.; Bauernhansl, T. (Geschäftsmodell-Innovationen):

Geschäftsmodell-Innovationen. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hrsg.) Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 245–260

Scheer (ARIS Vom Geschäftsprozess zum Anwendungssystem):

ARIS Vom Geschäftsprozess zum Anwendungssystem, 2002.

Schell, O. (Industrie 4.0 mit SAP):

Industrie 4.0 mit SAP. Strategien und Anwendungsfälle für die moderne Fertigung. 1st ed. Bonn: Rheinwerk Verlag, 2017.

Schleyer, C. (Erfolgreiches Kooperationsmanagement im Werkzeugbau):

Erfolgreiches Kooperationsmanagement im Werkzeugbau. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2006. RWTH Aachen, Aachen, 2006.

Schmidt, A. F.; Finan, C. (Linear regression and the normality assumption):

Linear regression and the normality assumption. In: Journal of clinical epidemiology. 98. Jg, 2018, S. 146–151

Schneeweiß, R. (Moderne C++ Programmierung):

Moderne C++ Programmierung. Klassen, Templates, Design Patterns. (Reihe: Xpert.press). 2. Aufl. Berlin: Springer, 2012.

Schuh, G. et al. (Industrie 4.0 Maturity Index):

Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten. (Reihe: acatech Studie). Update 2020. München: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2020.

Schuh, G. (Prozessmodell zum systematischen Wissenstransfer im Werkzeugbau):

Prozessmodell zum systematischen Wissenstransfer im Werkzeugbau. Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - Projektnummer 362536663, 2020. Online verfügbar unter <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/362536663?context=projekt&task=showDetail&id=362536663&Stand:02.09.2023>

Schuh, G.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; Hompel, M.; Wahlster, W. (Industrie 4.0 Maturity Index):

Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies. acatech STUDIE. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2017.

Schuh, G.; Boos, W.; Kelzenberg, C.; Lange, J.; Stracke, F.; Helbig, J.; Boshof, J.; Ebbecke, C. (Industrie 4.0: Implement it):

Industrie 4.0: Implement it! Ein Leitfaden zur erfolgreichen Implementierung von Industrie 4.0-Lösungen. 1. Aufl. Aachen: RWTH Aachen Werkzeugmaschinenlabor, 2018.

- Schuh, G.; Boos, W.; Kuhlmann, C.; Rittstieg, M.; Breme, M.; Hinsel, C.; Johann, H.; Schoof, U.; Stoffel, K. (Synchronisierung im industriellen Werkzeugbau):**
Synchronisierung im industriellen Werkzeugbau. In: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachener Perspektiven ; [AWK, Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2011, 26. bis 27. Mai ; Tagungsband. Aachen: Shaker, 2011, S. 373–405
- Schuh, G.; Boos, W.; Kuhlmann, K.; Schippers, M. (Der Werkzeugbau im Wandel):**
Der Werkzeugbau im Wandel. In: Kunststoffe, N. R. 10. Jg, 2012, S. 72–78
- Schuh, G.; Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R. (Engineering valley - Internet of production):**
Engineering valley - Internet of production auf dem RWTH Aachen Campus. Festschrift für Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Dr. h.c. mult. Walter Eversheim. 1. Auflage. Aachen: Apprimus Verlag, 2017.
- Schuh, G.; Häfner, C.; Hopmann, C.; Rumpe, B.; Brockmann, M.; Wortmann, A.; Maibaum, J.; Dalibor, M.; Bibow, P.; Sapel, P.; Kröger, M. (Effizientere Produktion mit Digitalen Schatten):**
Effizientere Produktion mit Digitalen Schatten. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 115. Jg, 2020, s1, S. 105–107
- Schuh, G.; Kelzenberg, C.; Lange, J.; Busch, M. (Effizienzsteigerung der Serienproduktion durch vorausschauende Werkzeugwartung):**
Effizienzsteigerung der Serienproduktion durch vorausschauende Werkzeugwartung. In: ZWF. 114. Jg, 2019, Nr. 12, S. 880–883
- Schuh, G.; Kelzenberg, C.; Lange, J. de; Busch, M.; Stracke, F.; Frey, C. (Predictive Maintenance):**
Predictive Maintenance. Aachen: WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH, 2020.
- Schuh, G.; Krüger, J.; Reinhart, G.; Bauernhansl, T. (WGP-Standpunkt Industrie 4.0):**
WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP). Stuttgart u. a., 2016.
- Schuh, G.; Potente, T.; Reuter, C.; Hauptvogel, A. (Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme):**
Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hrsg.) Handbuch Industrie 4.0 Bd.2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 75–92
- Schuh, G.; Potente, T.; Thomas, C.; Hauptvogel, A. (Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme):**
Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme. In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.) Industrie 4.0. Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 277–295

Schuh, G.; Prote, J.-P.; Gützlaff, A.; Thomas, K.; Sauermann, F.; Rodemann, N. (Internet of Production: Rethinking production management):

Internet of Production: Rethinking production management. In: Wulfsberg, J. P.; Hintze, W.; Behrens, B.-A. (Hrsg.) Production at the leading edge of technology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 533–542

Schuh, G.; Rebentisch, E.; Riesener, M.; Ipers, T.; Tönnies, C.; Jank, M.-H. (Data quality program management for digital shadows of products):

Data quality program management for digital shadows of products. In: Procedia CIRP. 86. Jg, 2019, S. 43–48

Schuh, G.; Riesener, M.; Prote, J.-P.; Dölle, C.; Molitor, M.; Schloesser, S.; Liu, Y.; Tittel, J. (Industrie 4.0: Agile Entwicklung und Produktion im Internet of Production):

Industrie 4.0: Agile Entwicklung und Produktion im Internet of Production. In: Frenz, W. (Hrsg.) Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 467–488

Schuh, G.; Salmen, M.; Kuhlmann, T.; Wiese, J. (Life-Cycle-Oriented Product-Service-Systems in the Tool and Die Making Industry):

Life-Cycle-Oriented Product-Service-Systems in the Tool and Die Making Industry. In: Procedia CIRP. 47. Jg, 2016, S. 555–560

Schuh, G.; Schmidt, C. (Produktionsmanagement):

Produktionsmanagement. (Reihe: VDI-Buch, Bd. 5). 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2014.

Schuh, G.; Schmitt, R.; Kühn, T.; Hienzsch, M. (“Low-Cost” Tools Through Life Cycle Observation):

“Low-Cost” Tools Through Life Cycle Observation. In: Procedia CIRP. 15. Jg, 2014, S. 526–530

Schuh, G.; Schmitt, R.; Pitsch, M.; Kühn, T.; Hienzsch, M. („Kostengünstigere“ Werkzeuge durch Lebenszykluskostenbetrachtung):

„Kostengünstigere“ Werkzeuge durch Lebenszykluskostenbetrachtung. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 108. Jg, 2013, Nr. 12, S. 972–975

Schuh, G.; Stich, V.; Basse, F. H.-U.; Franzkoch, B.; Harzenetter, F.; Luckert, M.; Prote, J.-P.; Reschke, J.; Schmitz, S.; Tücks, G.; Weißkopf, J. (Change Request im Produktionsbetrieb):

Change Request im Produktionsbetrieb. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.) Internet of Production für agile Unternehmen. AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017, 18. bis 19. Mai. 1. Auflage. Aachen: Apprimus Verlag, 2017, S. 109–131

Schuh, G.; Thomas, C.; Hauptvogel, A.; Brambring, F. (Achieving Higher Scheduling Accuracy):

Achieving Higher Scheduling Accuracy. Achieving Higher Scheduling Accuracy in Production Control by Implementing Integrity Rules for Production Feedback Data. In: Procedia CIRP. 19. Jg, 2014, S. 142–147

Schuh, G.; Varnhagen, V. (Fokus Automobilindustrie):

Fokus Automobilindustrie. Digitale Wertschöpfungsnetzwerke im Werkzeugbau. Aachen: Apprimus, 2013.

Schuh, G.; Walendzik, P.; Luckert, M.; Birkmeier, M.; Weber, A.; Blum, M. (Keine Industrie 4.0 ohne den Digitalen Schatten):

Keine Industrie 4.0 ohne den Digitalen Schatten. In: ZWF. 111. Jg, 2016, Nr. 11, S. 745–748

Schultes, T. K. (Gestaltungsmodell zur digitalen Vernetzung von Werkzeugbaubetrieben mit Lieferanten):

Gestaltungsmodell zur digitalen Vernetzung von Werkzeugbaubetrieben mit Lieferanten. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2019.

Schweiger, S. (Nachhaltige Wettbewerbsvorteile für Anbieter und Nutzer von Maschinen/Anlagen):

Nachhaltige Wettbewerbsvorteile für Anbieter und Nutzer von Maschinen/Anlagen. durch Lebenszykluskostenoptimierung schaffen. In: Schweiger, S. (Hrsg.) Lebenszykluskosten optimieren. Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2009, S. 14–34

Seelmann, V.; Hicking, J. (Projektmanagement):

Projektmanagement. In: Schuh, G.; Zeller, V.; Stich, V. (Hrsg.) Digitalisierungs- und Informationsmanagement. Handbuch Produktion und Management 9. 1. Aufl. 2022. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, S. 213–247

Seidlmeier (Prozessmodellierung mit ARIS):

Prozessmodellierung mit ARIS. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.

Sendler, U. (Industrie 4.0 grenzenlos):

Industrie 4.0 grenzenlos. (Reihe: Xpert.press). 1. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.

Senthilnathan, S. (Usefulness of Correlation Analysis):

Usefulness of Correlation Analysis. In: SSRN Journal, 2019.

Shearer, C. (The CRISP-DM model):

The CRISP-DM model. The new blueprint for data mining. In: Journal of Data Warehousing. 5. Jg, 2000, Nr. 4, S. 13–22

Shearer, C. (The CRISP-DM Model: The New Blueprint for Data Mining):

The CRISP-DM Model: The New Blueprint for Data Mining. In: Journal of Data Warehousing. 5. Jg, 2000, Nr. 4, S. 13–22

Siow, E.; Tiropanis, T.; Hall, W. (Analytics for the Internet of Things):

Analytics for the Internet of Things. In: ACM Comput. Surv. 51. Jg, 2019, Nr. 4, S. 1–36

Soder, J. (Use Case Production: Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0):

Use Case Production: Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0. In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.) Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 85–102

Soltanpoor, R.; Sellis, T. (Prescriptive Analytics for Big Data):

Prescriptive Analytics for Big Data. In: Cheema, M. A.; Zhang, W.; Chang, L. (Hrsg.) Databases Theory and Applications. (Reihe: Lecture Notes in Computer Science). Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 245–256

South, L.; Saffo, D.; Vitek, O.; Dunne, C.; Borkin, M. A. (Effective Use of Likert Scales in Visualization Evaluations: A Systematic Review):

Effective Use of Likert Scales in Visualization Evaluations: A Systematic Review. In: Computer Graphics Forum. 41. Jg, 2022, Nr. 3, S. 43–55

Spennemann, F. (Gestaltung von Organisationsstrukturen im Werkzeugbau):

Gestaltung von Organisationsstrukturen im Werkzeugbau. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss, 2001. (Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik, Bd. 2001,14). Aachen: Shaker, 2001.

Stachowiak, H. (Allgemeine Modelltheorie):

Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer, 1973.

Stahlknecht, P. (Datenorganisation):

Datenorganisation. In: Stahlknecht, P. (Hrsg.) Einführung in die Wirtschaftsinformatik. (Reihe: Heidelberger Taschenbücher). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1985, S. 139–197

Statistisches Bundesamt (Globalisierungsindikatoren):

Globalisierungsindikatoren. Außenwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Globalisierungsindikatoren/ausenwirtschaft.html?nn=213448#246052>, 2023, Stand: 06.11.2023

Statistisches Bundesamt (Wichtige Indikatoren zu Industrie, Handel und Dienstleistungen):

Wichtige Indikatoren zu Industrie, Handel und Dienstleistungen. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Basistabelle/Industrie-Handel-Dienstleistung.html>, 2023, Stand: 06.11.2023

Steven, M. (Industrie 4.0):

Industrie 4.0. Grundlagen - Teilbereiche - Perspektiven. (Reihe: Moderne Produktion). 1. Auflage. Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer, 2019.

Stracke, F. (Gestaltungsmodell für den vernetzten und synchronisierten Serienanlauf von Werkzeugen):

Gestaltungsmodell für den vernetzten und synchronisierten Serienanlauf von Werkzeugen. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2020.

Strongin, S.; Hindlian, A.; Lawson, S.; Banerjee, S.; Duggan, D. (A SURVIVOR'S GUIDE TO DISRUPTION):

A SURVIVOR'S GUIDE TO DISRUPTION. Global Markets Institute, 2019.

Talkhestani, B. A.; Schlögl, W.; Weyrich, M. (Synchronisierung von digitalen Modellen):

Synchronisierung von digitalen Modellen. In: atp. 59. Jg, 2017, 07-08, S. 62–69

Thier, K. (Storytelling):

Storytelling. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.

Tietjen, T.; Decker, A. (FMEA-Praxis):

FMEA-Praxis. Einstieg in die Risikoabschätzung von Produkten, Prozessen und Systemen. 4., überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2020.

Tomczak, T. (Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft):

Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft: Ein Plädoyer für den qualitativen Forschungsansatz. In: Marketing: ZFP – Journal of Research and Management. (Bd. 14): Verlag C.H.Beck, 1992, S. 77–87

Tönshoff, H. K.; Reinsch, S.; Eger, M. (Lebenszykluskosten von Werkzeugen und Formen):

Lebenszykluskosten von Werkzeugen und Formen. Verknüpfung von Angebotskalkulation und Lebenszykluskostenrechnung im Werkzeug- und Formenbau. In: wt. 95. Jg, 2005, 11-12, S. 872–876

Traeger, M.; Eberhart, A.; Geldner, G.; Morin, A. M.; Putzke, C.; Wulf, H.; Eberhart, L. H. (Künstliche neuronale Netze. Theorie und Anwendungen in der Anästhesie, Intensiv- und Notfallmedizin):

Künstliche neuronale Netze. Theorie und Anwendungen in der Anästhesie, Intensiv- und Notfallmedizin. In: Der Anaesthesist. 52. Jg, 2003, Nr. 11, S. 1055–1061

Ulrich, H. (Management):

Management. (Reihe: Schriftenreihe Unternehmung und Unternehmensführung, Bd. 13). Bern: Haupt, 1984.

Ulrich, P.; Hill, W. (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre):

Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium : Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt, 1976, S. 304–309

Ungermann, F.; Kuhnle, A.; Stricker, N.; Lanza, G. (Data Analytics for Manufacturing Systems):

Data Analytics for Manufacturing Systems. A Data-Driven Approach for Process Optimization. In: Procedia CIRP. 81. Jg, 2019, S. 369–374

van der Aalst, W. (Data Science in Action):

Data Science in Action. In: van der Aalst, W. (Hrsg.) Process Mining. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 3–23

van Echelpoel, W.; Goethals, P. L. M. (Variable importance for sustaining macrophyte presence via random forests: data imputation and model settings):

Variable importance for sustaining macrophyte presence via random forests: data imputation and model settings. In: Scientific reports. 8. Jg, 2018, Nr. 1, S. 1–12

VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2815:1978-05):

VDI-Richtlinie 2815:1978-05. Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung, 1978.

VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 2884:2005-12):

VDI-Richtlinie 2884:2005-12. Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC), 2005.

VDI/VDE-Gesellschaft (Cyber-Physical Systems):

Cyber-Physical Systems. Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation, 2013.

VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 5600):

VDI-Richtlinie 5600. Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems - MES), 2016.

VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 3714 - Blatt 1):

VDI-Richtlinie 3714 - Blatt 1. Implementierung und Betrieb von Big-Data-Anwendungen in der produzierenden Industrie (Blatt 1), 2022.

VDI/VDE-Gesellschaft, (VDI-Richtlinie 3714 - Blatt 2):

VDI-Richtlinie 3714 - Blatt 2. Implementierung und Betrieb von Big-Data-Anwendungen in der produzierenden Industrie (Blatt 2), 2022.

VDMA (Berechnung von Lebenszykluskosten):

Berechnung von Lebenszykluskosten. in der Investitionsgüterindustrie. Frankfurt am Main, 2012.

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., (VDMA 34160:2006-06):

VDMA 34160:2006-06. Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen (34160:2006), 2006.

Voigt, S.; Garrel, J. (Erfahrungssicherungsworkshops):

Erfahrungssicherungsworkshops. In: Kohl, H.; Mertins, K.; Seidel, H. (Hrsg.) Wissensmanagement im Mittelstand. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 115–120

Wang, R. Y.; Reddy, M. P.; Kon, H. B. (Toward quality data: An attribute-based approach):

Toward quality data: An attribute-based approach. In: Decision Support Systems. 13. Jg, 1995, 3-4, S. 349–372

Wardemann, T. (Rekursion in Modularen Organisationsstrukturen von Unternehmen):

Rekursion in Modularen Organisationsstrukturen von Unternehmen. Wiesbaden: Deutscher Universitäts Verlag, 2000.

Warnecke, H.-J.; Löhr, H.-G.; Kiener, W. (Montagetechnik):

Montagetechnik. Schwerpunkt der Rationalisierung. (Reihe: Buchreihe Produktionstechnik heute, Bd. 7). Mainz: Krausskopf, 1975.

Westkämper, E. (Einführung in die Organisation der Produktion):

Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.

Wing, J. M. (The Data Life Cycle):

The Data Life Cycle. In: Harvard Data Science Review, 2019.

Wirdemann, R. (Scrum mit User Stories):

Scrum mit User Stories. 2., erweiterte Auflage. München: Hanser Verlag, 2011.

Woodall, P.; Borek, A.; Gao, J.; Oberhofer, M.; Koronios, A. (An Investigation of How Data Quality is Affected by Dataset Size in the Context of Big Data Analytics):

An Investigation of How Data Quality is Affected by Dataset Size in the Context of Big Data Analytics. 19th International Conference on Information Quality (ICIQ), 2014.

Zhao, Y.; Qian, F.; Gao, Y. (Data Driven Die Casting Smart Factory Solution):

Data Driven Die Casting Smart Factory Solution. In: Wang, S.; Price, M.; Lim, M. K.; Jin, Y.; Luo, Y.; Chen, R. (Hrsg.) Recent Advances in Intelligent Manufacturing. (Reihe: Communications in Computer and Information Science). Singapore: Springer Singapore, 2018, S. 13–21

Ziskoven, H. (Methodik zur Gestaltung und Auftragseinplanung):

Methodik zur Gestaltung und Auftragseinplanung einer getakteten Fertigung im Werkzeugbau. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2013. (Reihe: Edition Wissenschaft Apprimus, Bd. 2013,17). 1. Aufl. Aachen: Apprimus Verlag, 2013.

Zwanzig, F. (Taktung der Unikatfertigung am Beispiel des Werkzeugbaus):

Taktung der Unikatfertigung am Beispiel des Werkzeugbaus. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2009. (Reihe: Edition Wissenschaft Apprimus, Bd. 2010,1). 1. Aufl. Aachen: Apprimus-Verl., 2010.

Zwicker, R. (Kostenfaktor oder Erfolgsgeheimnis):

Kostenfaktor oder Erfolgsgeheimnis. Der interne Werkzeugbau als Keimzelle des Unternehmenserfolgs (9), 2009. Online verfügbar unter <https://www.dr-zwicker.de/files/load/fachbeitraege/Fachbeitrag-Plastverarbeiter-August-09.pdf>, Stand: 18.07.2022